

**Avaliação do Desempenho Ambiental do uso da  
Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de  
Energia Elétrica**

**Maria de Figueiredo Simão Gorjão Clara**

Tese para obtenção de Grau de Mestre em

**Engenharia Química**

Orientadores:

Luiz Kulay

Sebastião Manuel Tavares Silva Alves

**Júri**

Presidente: Maria Matilde Soares Duarte Marques

Orientador: Sebastião Manuel Tavares Silva Alves

Vogal: Maria Joana Assis Teixeira Neiva Correia

**Setembro 2017**

## RESUMO

Este trabalho verificou e discutiu o efeito da forma de tratamento de situações de multifuncionalidade sobre o perfil de impacto da exportação de energia elétrica a partir de cogeração de biomassa de cana-de-açúcar, quando o produto é avaliado pela técnica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Foram elaborados três Macro Cenários de modo a se obter baixa, média e alta cogeração de eletricidade. Para cada um deles, 64 cenários de análise foram constituídos, tendo em conta critérios físicos e econômicos para distribuição de cargas ambientais. Caracterizou-se o desempenho de 1.0 kwh de eletricidade exportada no que se refere a Mudanças Climáticas (CC) e Demanda Primária de Energia (PED). Os resultados obtidos indicaram que a forma de repartição de cargas ambientais nas etapas de cogeração de eletricidade e da produção de etanol influenciam de maneira decisiva os resultados globais de CC e PED. A ação mostra ser inclusive mais relevante em termos de desempenho ambiental do que a maneira como se dá a partilha de cargas ambientais no processo agrícola, etapa em que se notam os principais focos de efeitos adversos gerados no referido sistema de produto.

Palavras chave: Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), Multifuncionalidade; bioeletricidade; impactos ambientais; metodologia.

## **ABSTRACT**

This thesis verified and discussed the effect of the treatment of multifunctionality situations on the impact profile of the electricity cogeneration from sugarcane biomass when the product is evaluated by the Life Cycle Assessment technique (LCA). Three Macro Scenarios were elaborated, obtaining low, medium and high cogeneration of electricity. For each one of them, 64 scenarios were established, considering physical and economic criteria for the distribution of environmental loads. The performance of 1.0 kwh of exported electricity in terms of Climate Change (CC) and Primary Energy Demand (PED) was characterized. The results indicate that the distribution of environmental loads in the cogeneration stage itself and at the ethanol production decisively influences the overall results of CC and PED. Those two phases showed to be even more relevant in terms of environmental performance than the way in which environmental charges are shared in the agricultural process, a stage in which the main sources of adverse effects generated in the said product system are noted.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Multifunctionality, bioelectricity, environmental impacts, methodology

# Sumário

1. Introdução e Objetivos .....	6
2. Revisão de Literatura .....	8
2.1 Caracterização dos mercados de produção de cana-de-açúcar, etanol e açúcar .....	8
2.2 Tecnologia de produção de cana-de-açúcar .....	11
2.3 Tecnologia de produção de etanol e açúcar com cogeração energética.....	14
3. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) .....	18
3.1 Conceitos de Ciclo de Vida e Avaliação de Ciclo de Vida.....	18
3.2 Usos e aplicações da ACV .....	18
3.3 Limitações .....	19
3.4 Método .....	21
3.4.1 Definição de Objetivo e Escopo .....	22
3.4.2 Análise de Inventário.....	24
3.4.3 Avaliação de Impacto.....	25
3.5 Interpretação.....	30
3.6 Abordagens da ACV .....	30
3.7 Tratamento de situações de multifuncionalidade: aspectos operativos .....	31
4. Referências .....	33

## Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição da cana para produção de etanol e açúcar.....	9
Figura 2 - Projeção do destino da cana-de-açúcar.....	10
Figura 3 - Consumo doméstico de etanol anidro e hidratado. ....	11
Figura 4 - Fluxograma da produção de açúcar e etanol, com cogeração. ....	16
Figura 5 - Estrutura metodológica da ACV.....	22
Figura 6 - Elementos da fase de AICV.....	28

# 1.Introdução e Objetivos

Uma das principais atividades produtivas do Brasil diz respeito à produção de açúcar e álcool, atualmente sofrendo um processo de modernização influenciado por mudanças na situação econômica do próprio país. O setor sucroalcooleiro apresenta no momento um grande desafio: atingir uma posição no mercado internacional, atendendo à demanda nacional.

De forma a atingir o objetivo anteriormente mencionado, as empresas do setor devem estar cada vez mais atentas ao desenvolvimento do mesmo, a fim de atender à sua competitividade e exigência. Dessa forma, é necessário um aumento na produtividade e diminuição de custos, de forma simultânea.

Em primeiro lugar, um aumento de produtividade deve ser atingido através de um aumento na produção de cana-de-açúcar e etanol, gerado pelo aumento do rendimento das cadeias produtivas em questão.

Em relação à diminuição de custos esta pode estar associada à diminuição de perdas e desperdícios do processos, tentando reaproveitando os mesmos. Como, por exemplo, a palha obtida na fase agrícola; e a cinza, a vinhaça e a torta de filtro que resultam da fase de produção de etanol. Uma forma de reaproveitamento da palha restante do processo agrícola é a sua reutilização para produção de energia elétrica para a fase de cogeração.

Espera-se um desenvolvimento da forma de reaproveitamento da palha para o futuro, tendo como base dois fatores importantes. O primeiro é referente à utilidade energética da palha, podendo ser convertida em eletricidade e ser utilizada para fornecer energia. O segundo se deve ao futuro Protocolo Agroambiental estabelecido entre o governo de São Paulo e a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA) a ser implementado no ano de 2021. Isto é, é esperado que haja a extinção da prática de queima na região de São Paulo no presente ano de 2017, região que apresenta a maior produção de cana-de-açúcar. A queima deve então ser substituída por tecnologia adequada. Ainda que os processos de reaproveitamento de resíduos apresente um grande custo associado, os produtos derivados a esse processo apresentariam uma maior qualidade, resultando uma receita mais elevada.

Mais do que o custo monetário associado a esse tratamento, o reaproveitamento da palha diminui em grande parte o impacto ambiental negativo do processo em questão, levando a uma maior aceitação do etanol produzido no Brasil, pelo mercado internacional

Na literatura técnica existe um grande número de estudos relativos ao reaproveitamento de palha contudo, essas abordagens têm somente como foco a termodinâmica dos processos de produção (LEAL, 2013). Abordagens com foco ambiental são, na sua maioria, voltadas para as emissões atmosféricas (RIPOLI e RIPOLI, 2009). Dessa forma, verifica-se uma lacuna com relação a estudos voltados para a avaliação do desempenho ambiental da cogeração de energia elétrica da palha da cana-de-açúcar, para diferentes condições de operação do sistema, taxas de adição de palha e sua umidade.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo o preenchimento da lacuna acima mencionada, através da utilização da técnica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que propõe

diagnósticos de desempenho ambiental de sistemas antrópicos. Consequentemente, espera-se que o mesmo estudo contribua para os sectores de planeamento energético como para o sucroalcooleiro, de forma a proporcionar uma oportunidade de melhoria dos mesmo, de forma sustentada.

## 2.Revisão de Literatura

### 2.1 Caracterização dos mercados de produção de cana-de-açúcar, etanol e açúcar

Levantamentos realizados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO no ano de 2013 colocam o Brasil no primeiro posto no ranking mundial dos países produtores de cana-de-açúcar. O desempenho em questão, de cerca de 768 milhões de toneladas (Mt), é tão expressivo que supera em 64% a produção agregada da Índia (341 Mt) e China (129 Mt) – que ocupam, respectivamente, os segundo e terceiro lugares na mesma classificação.

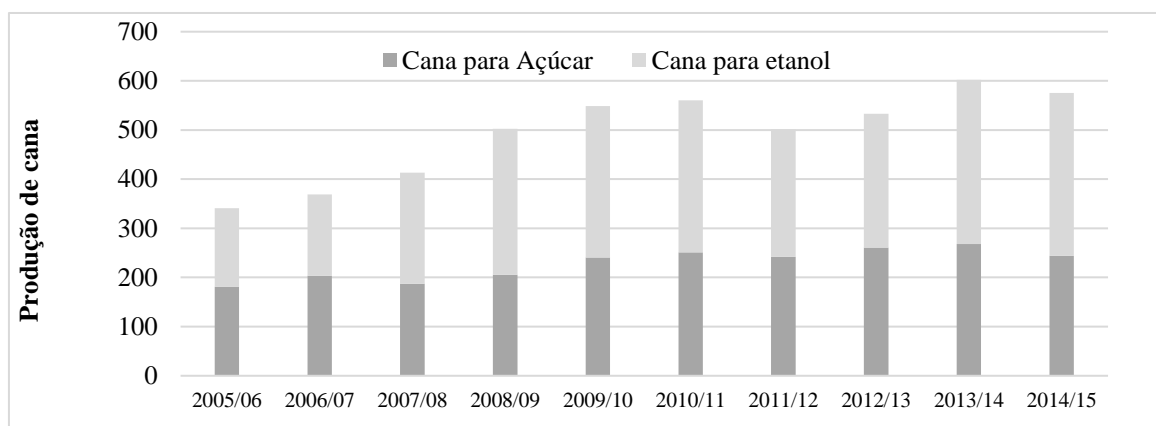
Em termos de repartição geográfica interna, estado de São Paulo apresenta-se, já há quase duas décadas, como o maior produtor de cana do país com 52% do total da área plantada (4,7 milhões de hectares). A este se seguem os estados de Goiás com 9,5%, Minas Gerais (8,8%), Mato Grosso do Sul (7,4%), Paraná (7,1%), Alagoas (4,3%) e Pernambuco (2,9%) (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2014).

Quanto aos destinos da produção observa-se uma equidade em termos do uso da cana colhida para suprimento de demandas dos segmentos de álcool e açúcar. No entanto, a cada safra tal proporcionalidade mostra-se cada vez mais condicionada a fatores de ordem mercadológica como custos de produção, oferta e demanda (Teixeira, 2013). O gráfico que aparece indicado na Figura 1, construído a partir de dados disponibilizados pela CONAB, apresenta essa mesma relação para as safras entre 2005/06 e 2012/13 de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Naquele caso, os valores de produção foram expressos em milhões de toneladas (Mt). Até a instalação da tecnologia flex-fuel, a cana-de-açúcar produzida na região Centro-Sul do Brasil atendia essencialmente o setor açucareiro. Essa tendência aparece na Figura 1 para os períodos 2005/06 e 2006/07, em que os consumos de cana para produção de açúcar corresponderam a 181 e 204 Mt, respectivamente. A partir da safra 2007/08 nota-se uma inversão de perfil em favor do setor alcooleiro, que já na safra 2008/09 passou a absorver 296 Mt, correspondendo a 59% do total produzido no período.

Com a quebra da produção da Índia em 2009/10 e a baixa rentabilidade do etanol no mercado interno em razão da política de preços de combustíveis que estava vigente no país à época, a atividade voltou-se gradativamente para a produção de açúcar que consome 240 Mt da oferta de cana no período (FIESP, 2013). No entanto, as projeções quanto ao destino da cana-de-açúcar para a próxima década, baseadas nas safras 2013/14 e 2014/15 indicam que o setor alcooleiro retomará a supremacia. A Figura 2 apresenta projeção relativa do destino da cana processada no Brasil para este horizonte temporal, estabelecido a partir da safra 2013/14.



Figura 1 - Distribuição da cana para produção de etanol e açúcar.



Fonte: CONAB (2005-2015)

As tendências verificadas nos dois anos anteriores devem em princípio se manter na safra 2015/16. Para as sete safras seguintes porém, a produção de cana deve voltar a sustentar a obtenção de etanol dado o crescimento da frota de veículos flex-fuel do país. Para que essa tendência de fato se confirme Teixeira (2013) coloca como condição mandatória a disponibilização de etanol no mercado consumidor com preços competitivos com os praticados para a gasolina.

Nas condições atuais, cerca de dois terços do açúcar produzido no país é exportado. Somente na safra 2013/14 cerca de 27 Mt de açúcar foram remetidas para o exterior, gerando uma receita de US\$11 bilhões. A título de comparação, a mesma produção gerou também a exportação de 2,6 bilhões de litros de etanol, que se reverteram em US\$ 1,7 bilhões em divisas para o Brasil (UNICA, 2014). Esses desempenhos elevaram o Produto Interno Bruto (PIB) do setor sucroenergético na safra 2013/14 ao patamar de US\$ 43,3 bilhões. O açúcar respondeu por 57% desse total, ao passo que ao etanol hidratado pode-se atribuir a maior contribuição relativa em termos de mercado interno, que representou pouco menos de 95% da receita conseguida com o ativo.

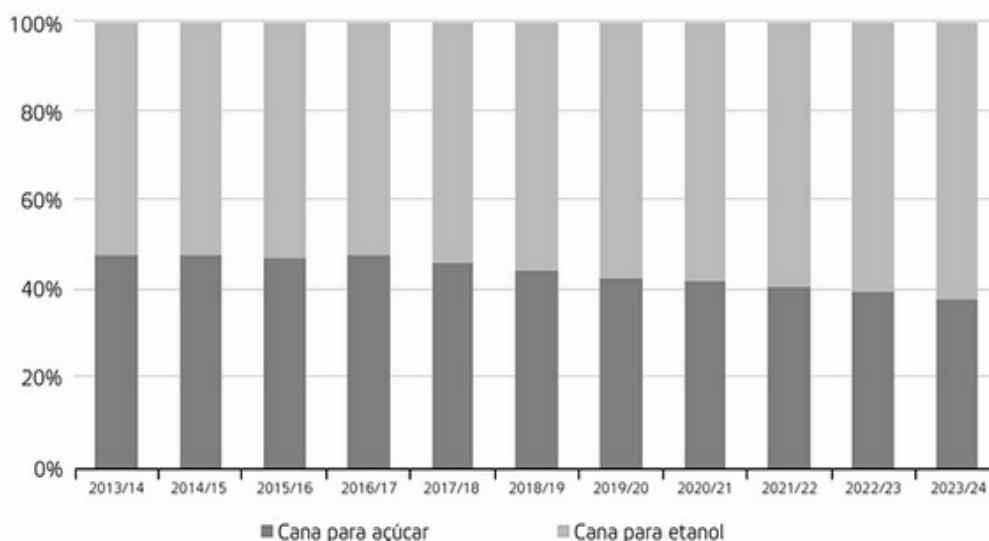


Figura 2 - Projeção do destino da cana-de-açúcar.

Fonte: FIESP (2013)

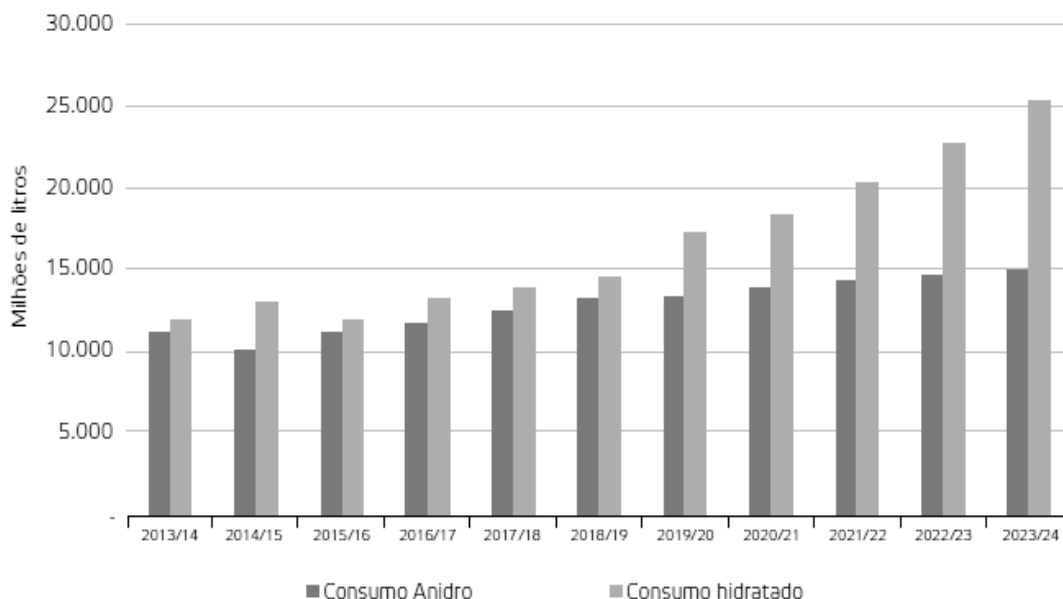
Além disso, a produção de etanol teve participação expressiva na geração de postos de trabalho no mesmo período, com a criação de pouco menos de 1 milhão de empregos diretos, além de outros 2,6 milhões de empregos indiretos e informais (ÚNICA, 2014). Para a safra 2015/16 estima-se a produção de 29 bilhões de litros de etanol, cerca de 0,5% maior que o obtido na safra anterior. Pouco mais de 41% deste total seriam gerados na forma de etanol anidro (99,7%<sub>ow/w</sub>) utilizado na mistura com gasolina; o restante, na forma hidratada (95%<sub>ow/w</sub>), serve a veículos flex-fuel.

Caso o prognóstico se confirme, a produção de etanol anidro experimentará um acréscimo de volume de produção de 3,0%, ao passo que a de seu homólogo hidratado, terá decréscimo de 1,2%. Tais desempenhos são comparados com relação àqueles alcançados pela safra anterior (CONAB, 2015).

A Figura 3 mostra a tendência quanto à produção de etanol anidro e hidratado para um período de dez anos. Esse perfil de evolução, traçado pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP), leva em conta a inversão da política praticada atualmente pelo Governo Federal com relação aos preços da gasolina, que resultaria em maior convergência destes valores com os praticados em outras partes do mundo.

A adequação criaria condições para que o etanol voltasse a ser competitivo nos mercados interno e externo, sustentando assim uma elevação do consumo médio do produto hidratado já a partir da próxima safra. Para projetar o comportamento futuro do etanol anidro a FIESP adotou a hipótese de que haverá manutenção da contribuição de 25%<sub>ow/w</sub> de gasolina para a mistura. Assim, espera-se que a demanda siga com taxas ligeiramente crescentes, tendo em conta, mais uma vez, o uso de gasolina na frota flex-fuel.

Figura3 - Consumo doméstico de etanol anidro e hidratado.



Fonte: FIESP (2013)

Quanto à produção de açúcar, estimativas realizadas pela CONAB para a safra 2015/16 projetam processamentos da ordem de 36 Mt, ou seja, uma redução de 4,0% de produção em relação ao total obtido em 2013/14 (CONAB, 2014). Esse cenário fundamenta-se na expectativa de redução da demanda de açúcar; na necessidade de liquidez das unidades produtoras com problemas financeiros; e, por fim, na receita obtida com a venda de açúcar, que é inferior àquela gerada pelo etanol (UNICA, 2014).

## 2.2 Tecnologia de produção de cana-de-açúcar

O cultivo da cana ocorre em dois ciclos. O primeiro ciclo é chamado de cana-planta, e se estende até o primeiro corte. O período da cana-planta pode ser de 12 ou 18 meses, conforme a variedade. Após o primeiro corte se inicia o ciclo da cana-soca, que passa a ser de 12 meses independentemente do tipo de cultivar plantado. Por permitir vários cortes, em geral até cinco, sem a necessidade de replantio a cultura da cana caracteriza-se pela semiperenidade. No entanto, a cada safra há necessidade de aplicação de insumos agrícolas de forma que a cultura continue com patamares de produtividade vantajosos (CONAB, 2014).

De maneira geral o processo de produção da cana se divide em três etapas: plantio, tratamentos culturais e colheita. Existem três formas de preparo do solo, na fase de plantio: Sistema Convencional, Sistema de Cultivo Mínimo e Sistema de Plantio Direto. Todos eles com o

objetivo deixar o solo nas melhores condições possíveis para o crescimento e o desenvolvimento da cana.

No Sistema Convencional de preparo do solo são executadas operações de aração, gradagem (para a eliminação dos torrões, e o preenchimento de lacunas do solo), subsolagem (rompimento de camadas muito compactas do solo), e calagem (adição de calcário). Todas elas realizadas durante o primeiro ciclo da cana.

No Sistema de Cultivo Mínimo as etapas convencionais de preparo do solo são substituídas por uma operação de subsolagem, tendo-se assim redução na erosão, no uso de máquinas e implementos agrícolas.

No Sistema de Plantio Direto, restos vegetais são deixados sobre a superfície do solo, este é revolvido apenas no sulco onde são depositadas as mudas e fertilizantes e as plantas infestadas são controladas por herbicidas. No Brasil o Sistema de Plantio Direto é cada vez mais frequente por proporcionar uma produção agrícola mais sustentável, com menores impactos ambientais e sem degradação do solo (Paraízo, 2013).

A nutrição do solo será completada mais adiante no processo, por meio de aplicação de formulações fertilizantes compostas de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) além de vinhaça, torta de filtro e cinzas (via fertirrigação) que, como já mencionado, são resíduos da etapa industrial de produção de etanol. Os tratos culturais visam proteger a plantação contra o ataque de ervas daninhas e pragas e evitar doenças. Esses males são combatidos com pulverização de herbicidas e agroquímicos (Sugawara, 2012).

Após um período de cultivo de 180 a 210 dias dá-se então início à colheita. Esta é a fase do processo que mais mudanças tecnológicas tem sofrido nos últimos anos em função de continuadas exigências sócio-ambientais e da necessidade de redução de custos de produção (CONAB, 2013). O tipo de colheita pode influenciar a produção, a longevidade da cultura, os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, o meio ambiente e a saúde pública (Ronquim, 2010).

Antes da implantação da colheita por sistema manual efetua-se a queima de biomassa com o objetivo de eliminar matéria seca existente na lavoura (esta pode ser reduzida em até cerca de 30%) e de abrir vias de circulação internas à área de plantio para que os cortadores de cana possam retirar as plantas. Além de impactos ambientais, essa ação reduz o teor de matéria-orgânica do solo (Cortez, 2010).

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar é cada vez mais frequente entre os sistemas de produção exercitados no Sul-Sudeste do Brasil, e em particular no estado de São Paulo. A Lei Estadual no 11.241/2002 dispõe sobre a eliminação gradativa da queima de biomassa na região. O dispositivo regulamenta ainda a implantação definitiva da colheita mecanizada em áreas mecanizáveis até o ano 2021, e em áreas não mecanizáveis até 2031 (BRASIL, 2002). Muito embora bastante clara com relação a seus propósitos, a Lei no 11.241 não foi capaz de alcançar os objetivos a que se propunha.

Em 2007 o governo do Estado de São Paulo e a União da Agroindústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) firmaram o chamado Protocolo Agroambiental. O acordo, criado com objetivo

de implantar e desenvolver ações de sustentabilidade na cadeia produtiva de açúcar, bioetanol e bioenergia tem como uma de suas principais metas antecipar a eliminação da queima na região. Assim, os prazos para a extinção da queima de biomassa foram antecipados: o ano de 2014 tornou-se limite para suspensão de tais práticas em terrenos cuja declividade ( $\varphi$ ) variasse entre  $0 \leq \varphi (\%) \leq 12$ ; enquanto 2017 foi definido como termo para suspensão de queimadas que ocorressem em áreas nas quais  $\varphi > 12\%$  (SMA/SP, 2015).

No sistema de colheita mecanizada, as folhas, as bainhas, o ponteiro, além de quantidades variáveis de pedaços de colmo são cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal denominada palha ou palhada. No entanto, há um aspecto prático importante a ser destacado: não é regra geral que a colheita mecanizada de cana extraia sempre cana crua, ou seja, sem que haja queima da palha. Ao contrário do que pode parecer, chega a ser usual proceder-se a combustão de palha nos canaviais previamente à entrada das colhedeiras com o intuito de melhorar o rendimento do processo (CONAB, 2013).

Cabe ressaltar alguns fatores sociais relacionados ao tipo de colheita de cana-de-açúcar. Verificou-se que as atividades de colheita manual envolvem altos riscos de saúde para os trabalhadores e as comunidades locais. A mecanização da indústria da cana deve melhorar também as condições de trabalho e a renda dos trabalhadores canavieiros. No entanto, a perda de emprego em consequência de modificação de procedimento – uma colhedeira substitui entre 80 e 100 cortadores de cana – coloca um grande desafio para o setor sucroenergético brasileiro, bem como para os Governos Estaduais e o Governo Federal (Du et al., 2015).

A escolha do método de colheita depende de fatores diversos, como: disponibilidade de mão-de-obra, aspectos socioeconômicos, configuração do terreno onde está implantado o canavial, sistema de carregamento a ser utilizado, entre outros. A Tabela 1 apresenta dados relativos ao tipo de colheita utilizada em diferentes regiões do Brasil.

Tabela 1 - Participação da colheita mecânica e manual no total da área colhida e da produção (2011/12).

Estado	Colheita manual (%)	Colheita Mecanizada (%)	Total de cana colhida (Mt)
São Paulo	27,8	72,2	305
Paraná	51,7	48,3	40
Minas Gerais	26,8	73,2	50
Goiás	20,4	79,6	45
Total: Região Centro-Sul	28,4	71,6	495
Alagoas	84,9	15,1	28
Pernambuco	98,4	1,56	17
Total: Região Norte-Nordeste	86,5	13,5	66
Total Brasil	36,1	63,9	561

Fonte: CONAB (2013)

O perfil apresentado na Tabela 1 indica ser a colheita manual a prática mais usual na região Norte-Nordeste do Brasil, onde o cultivo de cana é realizado por produtores que não possuem capital suficiente para adquirirem maquinário específico para cumprir a função. Segundo Du et al (2015), a produção nesta zona ocorre em menor escala do que a do Centro-Sul, podendo chegar a ser considerada inclusive como apenas de subsistência.

Por outro lado, seu grau de empregabilidade é mais elevada que o alcançado pelos cultivos extrativistas, o mesmo ocorre com a forma de distribuição de renda. A predominância de colheita manual é determinada também por fatores externos. Em Alagoas e Pernambuco, em que se registram as maiores produções de cana do Norte-Nordeste, a declividade do solo simplesmente inviabiliza a implementação da colheita mecanizada. Por conta disso, a disponibilidade de áreas de cultivo com potencial de mecanização nesses estados não vai além, de 48% e 50% (Moreno, 2011), respectivamente.

## 2.3 Tecnologia de produção de etanol e açúcar com cogeração energética

Os processos de produção de etanol e açúcar com cogeração energética a partir do bagaço de cana-de-açúcar aparecem descritos de forma sumarizada na Figura 4. A ação se inicia com a remoção a seco de parte (~ 70%) dos resíduos – terra, pedras e lixo – que aderem

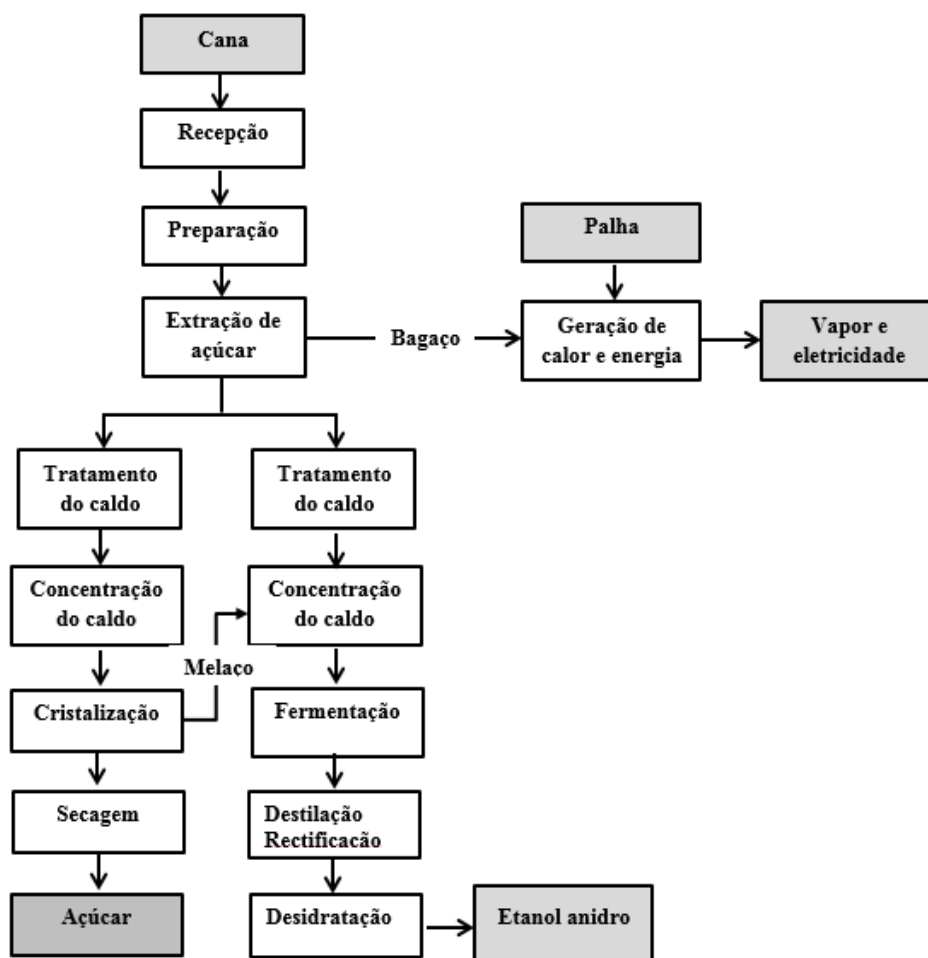
à cana que é trazida do campo (Dias et al., 2009). Concluída essa operação a cana é levada para a etapa de extração do caldo, a ser realizada por prensagem em tandens de moagem. O processo, que ocorre por via úmida e denomina-se imbibição consome cerca de 280 kg água /t cana alimentada. A eficiência da extração está condicionada ao número de estágios de moagem mas, em linhas gerais, varia entre 94 e 97% com relação à quantidade de açúcar disponível na cana. Deste processo originam-se dois produtos: o bagaço e o caldo misto. O primeiro, tal como já foi mencionado, será utilizado como combustível no sistema de cogeração, enquanto que o segundo segue para o próximo estágio de processo (Dias et al., 2009).

Algumas impurezas, dissolvidas e em suspensão, são separadas do caldo pela adição de reagentes químicos, como óxido de cálcio (CaO) e ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (Dias et al., 2009). É prática regular fazer uso de aquecimento para elevar as taxas de eficiência de purificação do caldo. Depois disso, o caldo passa por um separador *flash* antes de alimentar a unidade de clarificação, o qual será responsável pela separação entre precipitado e fração de clarificado. Esta última passa por uma etapa de filtração, da qual a fração líquida retorna ao processo para ser misturada à corrente principal de caldo. A fração sólida recolhida da filtração consiste da torta de filtro (Palacios-Bereche et al., 2014).

Neste momento do processo, o caldo clarificado contém cerca de 15%<sub>w/w</sub> de sólidos diluídos. Esse total deverá ser elevado com o objetivo de proporcionar taxas adequadas de conversão de sacarose em etanol durante a fermentação, e de manter dentro de limites aceitáveis os consumos energéticos despendidos com a purificação do produto. A concentração do caldo ocorre em evaporadores de efeito múltiplo (MEE) cujas condições de pressão e temperatura estão ajustadas para que o teor final de sacarose seja de 65%<sub>w/w</sub> (Dias et al., 2009).

Os açúcares se convertem em etanol por meio de fermentação alcoólica, por ação de leveduras sob condições controladas de pH e temperatura. O produto desta etapa é um substrato açucarado, conhecido como vinho. A fermentação alcoólica gera ainda CO<sub>2</sub> que deve ser escoado das dornas de fermentação para coibir problemas de elevação de pressão do meio, alteração de acidez, além de evitar que o tempo de residência da massa reacional dentro do vaso se reduza (Cortez, 2010).

Figura 4 - Fluxograma da produção de açúcar e etanol, com cogeração.



Fonte: Dias et al (2015)

Após a fermentação, o vinho – então contendo cerca de 8%<sub>w/w</sub> de etanol – é levado para o sistema de destilação para remoção de água. Este processo de separação gera etanol hidratado – 92,8% e 95%<sub>w/w</sub> C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O – além de uma grande quantidade de vinhaça (10-12 L/L produto). Para a produção de etanol anidro, uma etapa adicional de desidratação deve ser adicionada ao final do processo com vistas a obter-se um produto com até 99,7%<sub>w/w</sub> em etanol (Palacios-Bereche et al., 2014).

No processo de produção de açúcar, a concentração do caldo em sistema de MME gera o xarope, cujo excesso de água é removido em tanques de vácuo. Dentro desses vasos forma-se uma mistura de cristais de açúcar e xarope, que será transferida para cristalizadores. Nestes equipamentos a sacarose irá cristalizar, para então ser separada por processo de centrifugação. Água e vapor são usados para lavar os cristais (Dias et al., 2015).



Na moagem da cana são produzidos cerca de 140 kg bagaço / t cana (base seca) (Dias et al., 2011). Dado seu conteúdo energético – 7600 kJ/kg (50% umidade) – essa forma de biomassa serve de combustível para caldeiras, das quais emana vapor de média pressão (~ 20 bar). O vapor sofrerá sucessivas expansões até atingir condições termodinâmicas necessárias para ser usado em processos de aquecimento que ocorrem nas plantas de processamento de açúcar e de etanol.

Antes disso, porém, e com o intuito de melhor aproveitar a energia a ele associado, o vapor circula por turbina isentrópica cuja eficiência energética é da ordem  $\eta \sim 70\%$ . Esta unidade integra o Ciclo Rankine de cogeração, que se compõe ainda de válvula de expansão, condensador e bomba para produzir eletricidade para o processo (Nogueira et al., 2014).

Durante os últimos anos, desenvolvimentos tecnológicos têm sido realizados em caldeiras e turbinas com o objetivo de tornar os ciclos de cogeração não apenas mais eficientes, mas também, de permitir que esses operem com pressões de partida mais elevadas de até 200 bar (Guerra, 2014). O arranjo permite a geração de eletricidade excedente em relação àquela demandada por usinas e destilarias. Esse adicional de energia elétrica é exportado para a rede concessionária gerando receita para os produtores particularmente durante os períodos de entressafra em que a instalação permaneceria, naturalmente, em condição ociosa. Dado o aumento dos custos de energia elétrica e de petróleo no Brasil e no mundo, o uso de bagaço em sistemas de cogeração tem-se tornado uma alternativa bastante atraente em termos de produção dessa utilidade (Dias et al., 2011).

A quantidade de eletricidade produzida pelo processamento de cana pode ser significativamente aumentada, quando outras fontes de biomassa com conteúdo energético elevado – casos de palha e ponteira – são coletadas no campo para também servirem de combustíveis nos ciclos de cogeração.

Grandes quantidades de palha ficarão disponíveis à medida que a queima que ocorre antes da colheita manual for proibida. A tendência natural é que este material passe a ser uma opção de negócio atraente para as destilarias, sempre respeitando limites de incorporação do material.

Dados os teores médios de sílica e cloretos existentes na palha, seu limite de utilização para esse uso é da ordem de 50%  $w/w$  do total gerado (Seabra e Macedo, 2011). Apesar disso, Seabra et al registram experiências bem-sucedidas de consumo de palha para cogeração de eletricidade em unidades da região Centro-Sul, há mais de meia década (Seabra et al., 2010).

A cogeração com bagaço e palha proporciona não apenas maior oferta de eletricidade à rede concessionária nacional, como também amplia as possibilidades da oferta de energia elétrica durante o período de seca, quando a capacidade de geração das hidrelétricas costuma ser seriamente afetada (Hofsetz e Silva, 2012).

## **3. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**

### **3.1 Conceitos de Ciclo de Vida e Avaliação de Ciclo de Vida**

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica capaz de avaliar o desempenho ambiental de toda a sequência de atividades executadas na fabricação de um produto, ou na realização de um serviço. A extração e consumo de recursos (matéria e energia), assim como emissões para o ar, água e solo são quantificados em todas as etapas ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço (UNEP, 2002).

### **3.2 Usos e aplicações da ACV**

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

- Fornecer uma imagem, tão fiel quanto possível, de quaisquer interações existentes com o meio ambiente;
- Contribuir para o entendimento da natureza global e interdependente de consequências ambientais das atividades humanas;
- Gerar subsídios capazes de definir os efeitos ambientais dessas atividades e
- Identificar oportunidades para melhorias de desempenho ambiental.

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

- Identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental e
- Comparação ambiental entre produtos que cumprem funções equivalentes.

Na primeira vertente, a ACV atua empreendendo a busca dos principais focos de impactos ambientais proporcionados por um sistema de produto. Ao término de sua aplicação, o praticante terá estabelecido a contribuição do sistema em estudo para as diversas categorias de impacto ambiental. De posse desse diagnóstico, planos de ação voltados à minimização dos mesmos poderão ser estabelecidos (Fava, 1991; Vigon, 1993).

O uso da ACV com essa finalidade pode ser ilustrado por meio de um estudo realizado conjuntamente por pesquisadores das multinacionais do ramo de telecomunicações NTT e NEC em 2002. O trabalho em questão relata a aplicação da ACV para a elaboração de um diagnóstico ambiental de equipamentos e facilidades que compõem uma rede informação e de

comunicação por cabo no Japão (Takahashi et al, 2003). No uso da ACV para comparação de produtos de são avaliados os aspectos – e seus impactos associados – para diferentes formas de atender a uma mesma função.

A utilização da ACV com este viés encontra maior apelo junto a organizações empresariais desejosas de demonstrar a supremacia ambiental de seus produtos sobre os de seus concorrentes diretos, com o intuito de conquistar novos mercados. Por outro lado, quando efetuada confrontando o desempenho ambiental de um ou mais produtos contra um padrão pré-estabelecido a ACV pode servir para a elaboração de rótulos e declarações ambientais.

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

Nesta aplicação a ACV se presta à seleção de opções de projeto, em particular no que se refere à busca de novos materiais, formas de energia alternativas e implementação de melhorias de processo visando a minimização de perdas a concepção de produtos menos agressivos ao meio ambiente. Como exemplo pode-se citar um estudo realizado na Espanha em 2000 com dois tipos de luminárias para vias urbanas (Irusta e Nuñez, 2001). No caso em questão, comparou-se o produto existente – uma luminária confeccionada em alumínio – com outro, então cogitado para tornar-se seu substituto – com caixa de polietileno. As conclusões obtidas em decorrência da ACV estabeleceram diretrizes fundamentais para o projeto de uma luminária que provocasse menores impactos ao meio ambiente ao longo de todo seu ciclo de vida.

Outro uso da ACV ocorre junto a agências ambientais e organizações não-governamentais, em especial no que se refere à definição de políticas públicas visando a estruturação de sistemas sustentáveis. Tal iniciativa pode ser exemplificada por meio de estudo realizado em 2002 por técnicos da *Scottish Environment Protection Agency* com o objetivo de definir estratégias para gerenciamento de resíduos sólidos (Dryer e Ferguson, 2003). No caso em questão, a ACV foi usada como instrumento de seleção dentro de um universo de seis alternativas possíveis, do cenário mais adequado de gerenciamento de resíduos para cada uma das onze localidades do país selecionadas para esse fim.

### **3.3 Limitações**

A ACV vem se tornando uma ferramenta cada vez mais importante da Gestão Ambiental talvez pelo fato de ser a única dentre muitas voltadas a atuação na matéria em questão, que permita, dentro de uma abordagem sistêmica tanto a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de um produto, quanto a comparação ambiental de produtos que se prestem ao exercício comum de uma mesma função.

A condução de um estudo de ACV ocorre segundo uma sistemática bastante bem estruturada que relaciona simultaneamente diversas questões de cunho ambientais, além de ser baseada em sistemas quantificáveis. Estas duas características conferem à técnica um caráter aparentemente bastante objetivo.

Apesar do potencial que representa para o processo gerencial de tomada de a ACV apresenta ainda algumas limitações, as quais devem ser transpostas para que ela possa consolidar definitivamente como recurso contributivo à sustentabilidade no planeta.

Houve época em que a credibilidade da ACV foi posta a prova em razão do uso de seus resultados, situação ocorrida, por exemplo, quando diferentes estudos comparativos realizados para mesmos produtos apresentarem resultados não apenas dispares mas, antes disso, opostos. Ainda que houvesse acusações de má fé por parte de seus executantes, fato que infelizmente não poderia deixar de ser considerado, uma justificativa técnica para tamanha discrepância poderia ser formulada. A preocupação surgida na comunidade da ACV levou a estudos minuciosos sobre a origem das diferenças encontradas, e acabou por ser constatada tendo sido constatado que devido à complexidade do método, os critérios adotados para se definir os procedimentos de coleta de dados poderiam influir significativamente nos resultados finais.

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

A solução paliativa usada atualmente como uma tentativa de contornar esta limitação encontra-se especificada na norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) que dispõe como importante requisito a total e absoluta transparência na elaboração do relatório do estudo, o qual deve conter explicitamente todas as premissas e hipóteses adotadas ao longo da execução do estudo.

Neste sentido, faz-se necessário um grande investimento intelectual para o desenvolvimento e consolidação de um método de execução de estudos de ACV que viabilize a obtenção de resultados consistentes e reproduzíveis, sem, no entanto, prejudicar o atendimento dos inúmeros – e por que não dizer, bastante distintos objetivos – aos quais esta ferramenta se presta.

Outro obstáculo que dificulta a maior difusão do uso da ACV é o ainda elevado custo de sua execução o qual se deve, principalmente, ao número de dados a serem coletados. A solução que a comunidade científica encontrou para contornar essa deficiência consiste da construção dos chamados Bancos de Dados de auxílio à realização de estudos de ACV. Em linhas gerais, os Bancos de Dados são constituídos pelo inventário do ciclo de vida de elementos comuns aos ciclos de vida de muitos produtos.

Os Bancos de dados são construídos em geral para produtos e serviços de grande e variada utilização em estudos de ACV. Nesse contexto, serão objeto regular de elaboração de Bancos de Dados, materiais e serviços tais como: produtos metálicos (como aço, ferro e alumínio), poliméricos (caso do PVC, do polietileno - PE, e do PET), cerâmicos, vítreos, fibrosos (como papel e outros derivados), adesivos (caso de borrachas), entre outros; tecnologias para produção e de distribuição de energia; meios diversos de transporte; e cenários possíveis para disposição de resíduos. Ressalte-se que os Bancos de Dados têm que

ter caráter regional, uma vez que os inventários do ciclo de vida de dado elemento constituinte de um Banco de Dados podem diferir significativamente de região para região.

Apenas para encerrar o tópico Banco de Dados dentro do tema limitações da ACV, deve-se evidenciar que, assim como quaisquer estudos do gênero, os Bancos de Dados deverão passar por processo constante de atualização, a fim de que as tecnologias, procedimentos e condutas operacionais que os suportam permaneçam constantemente atualizadas. Dessa rotina depende o sucesso dos estudos de ACV que deles forem derivados.

Por fim, deve-se destacar ainda como limitação da ACV o tratamento de multifuncionalidades, o qual, como espera-se venha a ficar claro mais adiante, predispõe que decisões de caráter muitas vezes subjetivo sejam tomadas, influenciando assim, sobremaneira, os resultados do diagnóstico gerado via aplicação da técnica.

### **3.4 Método**

A norma ABNT ISO 14040:2009 (ABNT, 2009a) define ACV como: compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. Ainda segundo essa fonte, estudos dessa natureza compreendem quatro fases; quais sejam:

- Definição de Objetivo e Escopo
- Análise de Inventário
- Avaliação de Impacto
- Interpretação

A forma como as fases supracitadas se relacionam aparece indicada a seguir a partir do esquema constante da Figura 5, na próxima página. Nota-se por aquele arranjo a existência de um caráter iterativo entre essas etapas. Tal condição sugere a aplicação da técnica de ACV ocorrerá de forma plena apenas quando todos os requisitos que pautam cada etapa tiverem sido harmonizados.

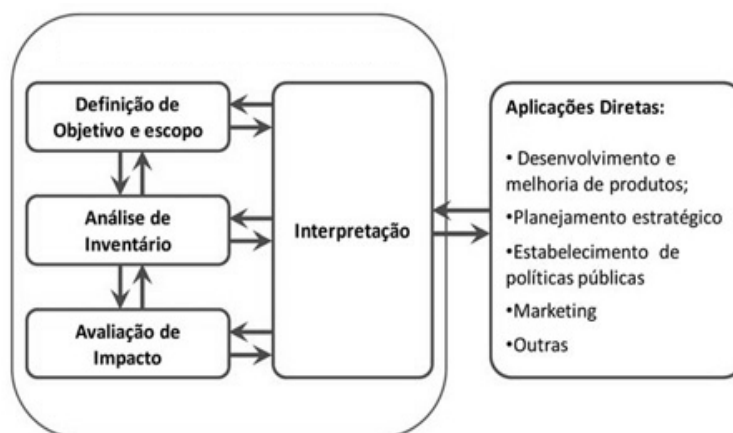


Figura 5 - Estrutura metodológica da ACV.

Fonte: ABNT (2009a)

Cada qual das etapas da ACV será objeto de exposição e discussão nas seções que se seguem deste arrazoado com vistas a dar a conhecer ao leitor suas principais especificidades e condicionantes.

### 3.4.1 Definição de Objetivo e Escopo

A definição de objetivos estabelece a razão principal para a condução do estudo, sua abrangência e o público-alvo a que os resultados se destinam. Segundo a ABNT NBR ISO 14040:2009, na definição do escopo são considerados aspectos metodológicos de ordem executiva para a condução do estudo, e é constituído pelos seguintes itens (ABNT, 2009a):

#### 3.4.1.1 Sistema de produto

Sistema de produto é a representação da realidade física do ciclo de vida de um produto, com a identificação de todas as unidades (processos elementares) e os fluxos que cada uma destas unidades troca entre si (fluxos de produto) e com o meio ambiente (fluxos elementares).

#### 3.4.1.2 Função

A função do produto indica o uso a que este se destina. A função deve ser claramente informada e, caso um sistema seja multifuncional (serve a mais de um propósito), as demais funções não consideradas no estudo devem ser justificadas e reportadas.

#### 3.4.1.3 Unidade funcional

A unidade funcional (UF) pode ser entendida como a quantificação do exercício da função (Silva e Kulay, 2007). Isto quer dizer que a UF especifica, de forma quantitativa a função do produto. Associado à unidade funcional está o fluxo de referência (FR), que especifica a quantidade de produto necessária para atender a unidade funcional estabelecida (Silva e Kulay, 2007).

#### **3.4.1.4 Fronteiras do sistema**

A fronteira do sistema define quais etapas do ciclo de vida, processos elementares ou até mesmo, entradas e saídas, são incluídas no estudo de ACV. Ainda dentro das fronteiras do sistema, a ABNT (2009a) trata sobre o uso de critérios de exclusão preliminar de entradas e saídas. Há um conjunto três critérios:

- Massa: inclusão de todas as entradas (ou saídas) cuja contribuição cumulativa superar uma porcentagem definida da entrada (ou saída) de massa do sistema de produto que está sendo modelado.
- Energia: similar ao critério acima, porém usando valores de energia ao invés de mássicos.
- Significância ambiental: aplicado para verificar se as entradas ou saídas excluídas preliminarmente pelos critérios de massa e energia não influem significativamente nos resultados finais, segundo um critério de relevância ambiental. Caso por ventura um dado aspecto ambiental seja excluído por se enquadrar em qualquer dos critérios anteriores, este poderia ser reintegrado ao inventário por conta de seu potencial de impacto.

#### **3.4.1.5 Situações de Multifuncionalidade**

Quando ocorre a geração de coprodutos em um processo elementar surge a questão de como atribuir a carga ambiental (entradas e saídas) entre o produto de interesse e os coprodutos, que não são relevantes para o sistema de produto em estudo. Esse tópico dentro da metodologia de ACV é conhecido como situação de multifuncionalidade.

A forma como as situações de multifuncionalidade devem ser abordadas não é, ainda, tema de consenso entre comunidade internacional da ACV, muito embora as normas da série ISO disponham sobre o tema. De qualquer forma, as alternativas previstas na literatura técnica para tratar questões de multifuncionalidade serão descritas em mais detalhes a seguir.

#### **3.4.1.6 Método de Avaliação de Impactos e Categorias**

Neste item do escopo devem constar informações a respeito da fase de Avaliação de impacto, quais sejam: categorias de impacto; indicadores das categorias consideradas; e o modelo de avaliação de impactos ambientais adotado.

#### **3.4.1.7 Qualidade dos dados**

A disponibilidade de dados, bem como sua qualidade, é fundamental para o sucesso de um estudo de ACV. Para tanto, é preciso que sejam definidos alguns requisitos de qualidade dos dados, os quais devem guardar sempre consonância com o objetivo e escopo da ACV. Kulay e Seo (2010) descrevem de maneira sucinta esses requisitos como:

- Cobertura Temporal: determina o período cuja situação de mercado é descrita pelos dados. Nesse contexto, fatores como idade, extensão do período e frequência, são considerados são definidos para efeito de coleta de dados;

- Cobertura Geográfica: dispõe sobre a amplitude geográfica a ser considerada no estudo para efeito de coleta de dados;
- Cobertura Tecnológica: esta trata de representar o “mix” de tecnologias em uso, de acordo com o escopo e com as coberturas geográfica e temporal;

#### **3.4.1.8 Pressupostos e Premissas**

Uma vez que diferentes decisões podem alterar significativamente os resultados de uma ACV, cada escolha ou premissa deve ser devidamente justificada e reportada. É importante informar todos os pressupostos adotados no estudo para que este possa ser reproduzido por um terceiro, de forma que os mesmos resultados sejam alcançados.

#### **3.4.1.9 Revisão Crítica**

Ainda como item de escopo, cabe informar se é previsto o processo de revisão crítica do estudo, seja por especialista interno ou externo. Em qualquer um destes casos, a revisão deve ser conduzida por um especialista não envolvido com a condução da ACV. As constatações e recomendações feitas pelo revisor devem ser incluídas no relatório final do estudo (ABNT, 2009a).

### **3.4.2 Análise de Inventário**

Nesta etapa são identificadas e quantificadas entradas e saídas de energia e de matéria do sistema de produto. A Análise de Inventário consiste basicamente em duas etapas: coleta de dados e tratamento dos dados (Silva e Kulay, 2010).

#### **3.4.2.1 Coleta de dados**

A coleta de dados corresponde ao levantamento das informações do ciclo de vida do produto, dados que devem obedecer aos requisitos de qualidade definidos na fase de escopo. Os dados a serem levantados devem trazer informações quantitativas, bem como de natureza qualitativa, que descrevem os requisitos de qualidade a que estão associados.

Na maioria dos casos os dados primários estão indisponíveis, ou simplesmente inexistem; dessa forma, uma mescla entre dados primários e secundários são adotados. Em estudos de ACV, comumente recorre-se ao uso de bancos de dados internacionais embutidos nos softwares de apoio a estudos de ACV. No entanto, não se devem utilizar estas fontes sem antes fazer uma análise crítica, uma vez que as coberturas geográfica, temporal e tecnológica podem não representar a realidade a qual se pretende modelar (Silva e Kulay, 2007).

#### **3.4.2.2 Tratamento de dados**

O processo de coleta de dados geralmente gera um conjunto de informações que estão na forma bruta. Estes dados brutos ainda não estão prontos para compor o ICV, cabendo então ao executor da ACV verificar se os requisitos de qualidade foram atendidos, aplicar balanços de



massa, etc., e depois, correlacionar os dados validados à unidade funcional (ou fluxo de referência). Esta etapa do estudo de ACV é conhecida como tratamento dos dados.

### **3.4.3 Avaliação de Impacto**

Nesta fase da técnica, os aspectos ambientais coletados e tratados do Inventário de Ciclo de Vida serão relacionados aos seus respectivos impactos ambientais. A AICV é composta por elementos mandatórios e opcionais, como está apresentado mais adiante na Figura 6.

#### **3.4.3.1 Seleção de Categorias de Impacto**

De acordo com Pereira (2004), a seleção das categorias de impacto ambiental deve ser baseada nos resultados do inventário, com vistas aos aspectos ambientais mais relevantes para o estudo, segundo as considerações previamente feitas durante a fase de objetivo e escopo. Neste momento, também são definidos os indicadores ambientais e os modelos de caracterização a serem posteriormente utilizados nas etapas obrigatórias subsequentes da AICV. Ferreira (2004) lista premissas que devem ser consideradas durante a seleção das categorias de impacto:

- As categorias devem permitir uma avaliação abrangente dos principais impactos resultantes dos fluxos de entrada e saída que foram calculados no inventário do ciclo de vida;
- As categorias devem evitar sobreposição de impactos;
- As categorias devem ser reconhecidas e aprovadas internacionalmente;
- O número de categorias de impacto não deve ser excessivo, a fim de reduzir a complexidade do estudo e possibilitar melhor análise crítica dos resultados.

A quantificação dos resultados das categorias de impacto é realizada com base no estabelecimento de indicadores que estabelecem uma medida comum e científica para a conversão dos valores dos aspectos ambientais.

A profundidade com que os impactos são avaliados é definida por meio da adoção de indicadores intermediários - midpoints - e indicadores finais - endpoints. O primeiro grupo de indicadores, midpoint, restringe-se a analisar os efeitos primários diretos ocasionados pela disposição e consumo de um determinado aspecto ambiental. Portanto, a modelagem do tipo midpoint resulta em avaliações menos complexas, abarcando potenciais de aquecimento global, toxicidade humana, depleção de recursos naturais, dentre outros (Kulay, 2004). Já os indicadores finais, denominados endpoints, visam avaliar os efeitos finais da cadeia de causa e efeito sobre o meio ambiente e a saúde humana (Sugawara, 2012).

Monteiro (2008) exemplifica o indicador endpoint com a categoria de mudanças climáticas, a qual representa as emissões de gases efeito estufa utilizando a radiação infravermelha como indicador ambiental. Neste caso, diferentes ordens de impacto são contempladas no

estudo, tais como: a perturbação no balanço da radiação; o aumento da temperatura global; o derretimento das camadas de gelo e o conseqüente aumento no nível dos oceanos.

### 3.4.3.2 Categorias de Impacto

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) do sistema produtivo em análise foi realizada tendo em conta duas abordagens. A primeira delas, que permite realizar estimativas de consumo de recursos em termos de Demanda de Energia Primária (PED), foi conduzida a partir da aplicação do método Cumulative Energy Demand (CED) versão 1.09 (Frischknecht et al., 2007). A opção pelo CED deveu-se ao fato deste método permitir a quantificação simultânea de PED em diferentes subcategorias de energia, tanto de procedência renovável (biomassa: RB, vento: RWD e água: RWA), como não-renovável (fóssil: NRF, nuclear: NRN e biomassa: NRB).

Ao dispor deste recurso o CED proporciona benefícios para a análise em questão em dois âmbitos: (i) de fornece uma especificação precisa e detalhada do desempenho ambiental do sistema do produto e (ii) de respaldar de maneira mais adequada a caracterização dos efeitos do cultivo mecanizado de cana-de-açúcar em termos de demanda de energia.

O uso de CED na avaliação de impactos associada a extrações de recursos gera subsídios para formulação de dois indicadores de desempenho energético consistentes, e que respaldam reflexões importantes sobre o desempenho ambiental da exportação de energia elétrica a partir de queima de biomassa de cana-de-açúcar. O primeiro desses indicadores (R1) relaciona a quantidade de energia elétrica exportada, com o consumo energético total para obtenção daquela. A partir de R1 é possível saber quanto de energia primária será necessário para se obter 1,0 kWh de eletricidade a partir de cogeração de biomassa (palha e bagaço) de cana em ciclo Rankine, independentemente da procedência dessa mesma energia.

$$R1 = \frac{\text{Eletricidade Exportada (1kWh)}}{\text{Energia Consumida (CED)}_{Total}}$$

O segundo indicador (R2) segue por um caminho semelhante; no entanto, nesse caso o quociente que o justifica acaba por relacionar 1,0 kWh de eletricidade exportada apenas com energia consumida de origem não-renovável. Esta abordagem se propõe a verificar, segundo um ótica sistêmica, o quanto de recursos fósseis seriam consumidos para geração de 1,0 kWh de energia a partir de ativos renováveis.

$$R2 = \frac{\text{Eletricidade Exportada (1kWh)}}{\text{Energia Consumida (CED)}_{Fóssil}}$$

Foram também totalizados os efeitos ambientais decorrentes de emissões de Gases de Efeito Estufa (GHG) geradas pelo sistema do produto. Para este caso fez-se uso do método ReCiPe - midpoint (H) versão 1.12 (Goedkoop et al., 2013) especificamente para a categoria de impacto da Mudança Climática (CC). Não existem métodos específicos de avaliação de

impacto para as condições e biomas brasileiros (Silva et al., 2015). Diante desta constatação, procedeu-se um levantamento acurado junto à literatura técnica disponível sobre o tema para, com base nos dados identificados por esta ação, optar pelo método ReCiPe. De acordo com Hauschild et al. (2013), o método ReCiPe adota modelos consistentes de caracterização do nível intermediário (de *Midpoint*) para avaliar impactos em termos de CC (Forster, 2007).

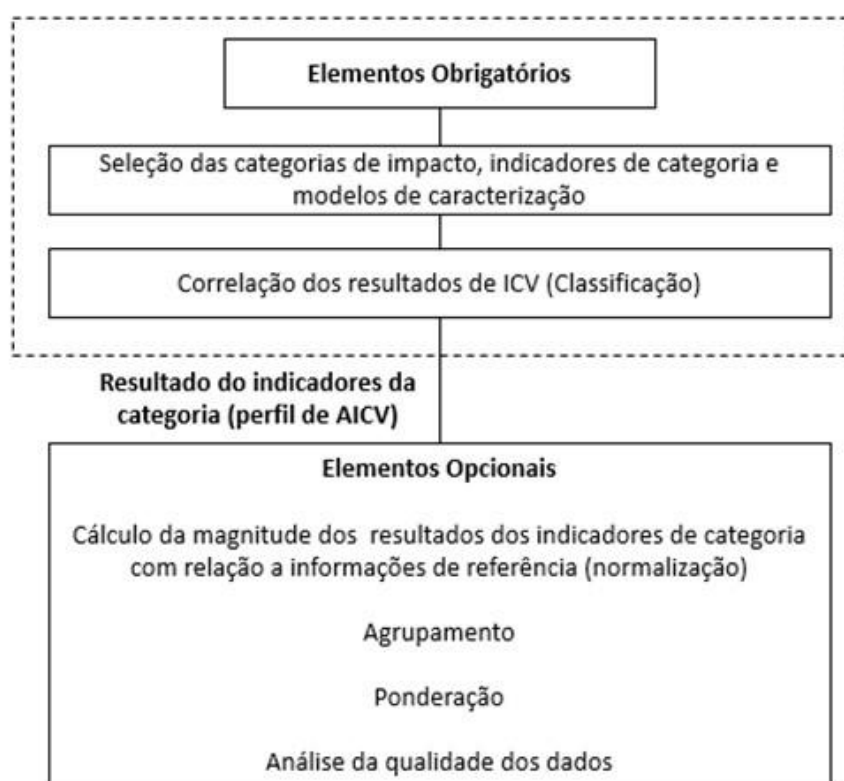
Esta abordagem corrobora as expectativas originais desta pesquisa. Por fim, vale destacar que as duas categorias selecionadas para compor o Perfil de Impactos Ambientais do sistema em análise, para as condições ao que o mesmo foi submetido, são compatíveis com um sistema de produtos que coordena operações de larga escala nos domínios agrícola, industrial e de transporte, como é o caso do bioetanol no estado de São Paulo.

### **3.4.3.3 Classificação**

O agrupamento qualitativo dos aspectos ambientais em relação às categorias de impacto é realizado na etapa de classificação. Tal atividade é necessária, uma vez que diferentes aspectos podem contribuir para impactos distintos, sendo esta característica avaliada cientificamente. Neste sentido, os fluxos elementares são associados a um indicador midpoint, cujas informações são posteriormente ordenadas em indicadores finais – endpoints, tal como ilustra a Figura 6 (UNEP, 2011).

Os fluxos de entrada e saída dos processos elementares podem ser contabilizados integralmente mais de uma vez durante a classificação, desde que os impactos ocasionados sejam independentes um do outro (Jensen et.al., 1997). Em contra partida, para os casos em que um único aspecto contribui para categorias dependentes, a ABNT 14044 (2009b) sugere realizar mecanismos distributivos.

Figura 6 - Elementos da fase de AICV.



Fonte: ABNT (2009a)

#### 3.4.3.4 Caracterização

Após a classificação, os resultados obtidos no inventário são correlacionados quantitativamente na etapa de caracterização. A quantificação dos resultados para cada categoria de impacto é realizada com base no estabelecimento de fatores de referência, os quais são representados algebricamente por um composto capaz de expressar a magnitude de contribuição das demais substâncias na referida categoria.

Este composto é utilizado como base de comparação científica para a determinação dos fatores de equivalência para cada substância dentro de cada categoria de impacto. Assim sendo, o impacto ambiental total da categoria é expresso pela Equação 1 que aparece indicada a seguir:

$$S_j = \sum Q_{ji} \cdot m_i \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- $S_j$  = impacto total da categoria  $j$ ;
- $m_i$  = quantidade da carga ambiental ( $i$ ) associada aos fluxos de matéria e energia calculados no inventário;
- $Q_{ji}$  = fator de equivalência para a carga ambiental ( $i$ ) na categoria de impacto ( $j$ ).

A composição dos desempenhos ambientais para as categorias de impacto resulta no chamado Perfil de Impacto Ambiental, última atividade obrigatória da fase de AICV.

### 3.4.3.5 Normalização

A normalização é o primeiro dos procedimentos não obrigatórios da AICV. A partir dele é possível relacionar os resultados das categorias de impacto do perfil para uma situação de referência, fornecendo informações sobre sua significância relativa. De acordo com Ferreira (2004), esta relação ocorre por meio da divisão da carga total de uma categoria de impacto pela magnitude real desta mesma categoria. Alguns exemplos de fatores de normalização são: a utilização de recursos por uma dada área global, regional ou local; as emissões ou consumos totais em uma dada área em base *per capita*; ou a razão entre o valor de uma alternativa e outra.

Assim, em meio às comparações possíveis, o desenvolvimento da normalização permite identificar a representatividade do impacto ambiental causado pelo objeto em estudo para uma categoria específica, perante o impacto total causado por todos os processos produtivos de um país para a mesma categoria de impacto.

Passuello (2007) exemplifica esta possibilidade por meio das emissões de dióxido de carbono de um produto. Nesse caso, o objeto em estudo emite 1 t CO<sub>2</sub> equivalente (ou 1 t CO<sub>2</sub> eq), enquanto a contribuição anual do país onde este é manufaturado é de 1000000 t CO<sub>2</sub> equivalente. Assim, a contribuição normalizada do produto é 10<sup>-6</sup> ano, ou 31,5 segundos.

O perfil de impacto ambiental normalizado é produto final desta etapa, que apresenta uma série limitações. Dentre elas tem-se, principalmente, a dificuldade de obter valores confiáveis que, quando não fiéis à realidade, podem alterar os resultados do estudo (Sugawara, 2012).

### 3.4.3.6 Agrupamento

A etapa de agrupamento tem por objetivo reordenar as categorias de impacto. Esta atividade, de acordo com a ABNT NBR ISO 14044 (2009b), pode ser realizada a partir de duas premissas distintas:

- Agrupando as categorias que apresentam características comuns, como abrangência geográfica local, regional ou global; ou,
- Organizando as categorias de impacto segundo um critério de importância relativo e não numérico.

Baumann e Tillman (2004) colocam que o agrupamento possui benefícios quanto à apresentação dos resultados, ordenando as informações de maneira mais compreensível ao leitor. Monteiro (2008) comenta que o uso de fatores de impacto pode comprometer a clareza e confiabilidade dos resultados por não considerar as condições locais onde os impactos foram gerados.

### 3.4.3.7 Ponderação

A ponderação pode ser definida como um método qualitativo ou quantitativo, no qual as categorias de impactos são relacionadas entre si para a avaliação de sua importância. O intuito desta atividade é criar um indicador único de desempenho ambiental para o objeto de estudo. Critérios sociais e científicos, dentre outros princípios, são adotados para o desenvolvimento de

fatores de peso que se diferem conforme o país de origem (Ribeiro, 2009). Destacam-se entre os critérios:

- Monetização: avaliação econômica, cuja abordagem visa atribuir custos aos impactos ambientais ou preços pela modificação da qualidade ambiental. O preço pode ser resultado da “disposição a pagar” dos indivíduos afetados pelos prejuízos ambientais ocasionados pelo atendimento da função do objeto em estudo. Esta abordagem é baseada em valores e preferências sociais.
- Limites projetados: resultado da diferença entre os níveis atuais de poluição e os limites desejados, definidos por autoridades ambientais ou por padrões internos de uma companhia.
- Abatimento tecnológico: método que estuda a possibilidade de redução da carga ambiental por meio da adoção de diferentes tecnologias.
- Painéis sociais: emprega a opinião de acadêmicos e autoridades interessadas para a definição de fatores de peso entre as categorias de impacto.

A ponderação pode ser realizada a partir da aplicação da Equação 2 indicada a seguir (Ferreira, 2004):

$$X = \sum W_j \cdot N_j \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- $X$  = índice ambiental;
- $W_j$  = fator de ponderação para a categoria de impacto  $j$ ;
- $N_j$  = resultado normalizado do impacto  $j$ .

A subjetividade é uma característica inerente ao processo de ponderação, visto que esse envolve a adoção de premissas sociais baseadas na importância e na relevância percebidas (Baumann e Tillman, 2004). Contudo, Ferreira (2004) afirma que a ponderação pode assumir um perfil racional com o uso de teorias de decisão, as quais são desenvolvidas cientificamente.

### **3.5 Interpretação**

Uma vez realizada a AICV, os resultados do estudo são gerados, tanto no que se refere aos dados de inventário quanto aos impactos ambientais potenciais associados ao ciclo de vida do produto. Estes resultados e todas as escolhas e premissas adotadas ao longo do estudo devem então ser interpretados, levando em consideração a definição de objetivo e escopo. Esta fase de análise dos dados, resultados e a forma como os resultados foram gerados é chamada de Interpretação.

### **3.6 Abordagens da ACV**

Atualmente, são aceitas pela comunidade internacional mesmo que com restrições os enfoques atribucional e consequential para classificar os estudos de ACV. ACV atribucional

quantifica as entradas e saídas dentro de um sistema de produto, de acordo com a unidade funcional estabelecida. Por outro lado, a ACV consequencial é uma abordagem onde se busca estimar (ou prever) como as entradas e saídas irão se alterar dentro de um sistema de produto por decorrência de uma tomada de decisão que varia o valor da unidade funcional. Na ACV consequencial, os processos elementares que não são afetados pela mudança na demanda não são parte do sistema de produto em estudo, ao contrário da ACV atribucional que leva em consideração todos os processos elementares que contribuem significativamente dentro de um sistema em estudo. (Baumann e Tillman, 2004).

### **3.7 Tratamento de situações de multifuncionalidade: aspectos operativos**

Tal como fora descrito antes na seção 3.4.1.5, o processo multifuncional é aquele em que há mais de uma entrada ou saída de produtos carregados de valor comercial ou ambiental. Nesse caso, é necessário atribuir cargas ambientais entre os coprodutos no sistema em estudo. Esse tópico dentro da metodologia de ACV é conhecido como alocação.

A alocação é um processo bastante delicado pois não há uma maneira certa de fazê-lo, passando por uma decisão do agente que está por trás da Análise do Ciclo de Vida. Para auxiliar nessa tomada de decisão, existem diferentes abordagens metodológicas que lidam com a alocação. A ABNT 14040 (2009a) sugere as seguintes opções:

- Evitar a alocação:
  - Por meio da divisão do processo elementar multifuncional em dois ou mais subprocessos, e coleta dos dados de entrada e saída que estejam relacionados a esses processos;
  - Por meio da expansão do sistema de produto de modo a incluir as funções adicionais relacionadas aos coprodutos.
- Subdivisão das entradas e saídas entre seus diferentes produtos, de maneira a refletir as relações físicas (massa ou energia) entre eles.
- Alocação por outras relações, como valor econômico

Qualquer que seja o critério de alocação escolhido, o mesmo deve ser aplicado de forma uniforme ao longo do estudo e reportado no relatório final.

Outra forma de lidar com um sistema que possui multifuncionalidades é através da expansão de fronteiras. Isto é, contrariamente ao descrito acima, as cargas ambientais relativas à geração de coprodutos são atribuídas somente ao produto em estudo.

Em geral, um processo elementar gera mais do que um produto, provocando situações de multifuncionalidade. Assim, não é adequado colocar toda a carga ambiental no mesmo, mas sim dividi-la pelos vários coprodutos formados. Dessa forma, o presente estudo utilizou o

processo de alocação, ao invés do processo de expansão de fronteira, por se tratar de um sistema caracterizado por apresentar multifuncionalidades.



## 4. Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2013. ISSN 1983-5884. 232 pp.

BAUMANN H.; TILLMAN A. M. The hitch hiker's guide to LCA. Suécia: Studentlitteratur AB, 2004.

BRASIL, SÃO PAULO. Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. São Paulo, 2002.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Avaliação da Safra Agrícola de Cana-de-açúcar. SAFRA 2005/06. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2005, 13pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Avaliação da Safra Agrícola de Cana-de-açúcar. SAFRA 2006/07. Terceiro Levantamento. Novembro de 2006, 9pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2007/08. Terceiro Levantamento. Novembro de 2007, 12pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2008/09. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2008, 17pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2009/10. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2009, 14pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2010/11. Terceiro Levantamento. Janeiro de 2011, 19pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2011/12. Terceiro Levantamento. Dezembro de 2011, 18pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2012/13. Quarto Levantamento. Abril de 2013, 18pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2013/14. Quarto Levantamento. Abril de 2014, 19pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2014/15. Terceiro Levantamento. Dezembro/2014. 31pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Safra 2015/16. Segundo Levantamento. Agosto/2015. 35pp.

\_\_\_\_\_. CONAB. Perfil do Setor do Açúcar e do Álcool no Brasil. Safra 2011/2012, p. 1-88, 2013.

Cortez, L. A. B (Ed). Bioetanol de Cana-de-Açúcar P&D para Produtividade e Sustentabilidade. Ed Blucher. 2010. 992p. ISBN: 9-788521205319

DIAS, M. et al. Production Of Bioethanol And Other Bio-Based Materials From Sugarcane Bagasse: Integration To Conventional Bioethanol Production Process. Chemical Engineering Research And Design, v. 87, p. 1206–1216, 2009.

DIAS, M. et al. Second Generation Ethanol In Brazil: Can It Compete With Electricity Production? Bioresource Technology, v. 102, p. 8964–8971, 2011.

DRYER, A., FERGUSON, J. The National Waste Plan for Scotland – LCA and BPEO in Practice. *In*: InLCA/LCM–Life Cycle Assessment/Life Cycle Management: a bridge to a sustainable future. 2003. Seattle. (2003) – InLCA/LCM – Seattle

FAVA, J.A., ed. A technical framework for life-cycle assessments. Washington, D.C., Society of Environmental Toxicology and Chemistry: SETAC Foundation for Environmental Education, Vermont, 1991. 134 p.

FERREIRA, J. V. R. Análise do Ciclo de Vida de Produtos. Viseu: Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FIESP – Federação Das Indústrias Do Estado De São Paulo. Outlook Fiesp 2023. Projeções Para O Agronegócio Brasileiro, 2013.

GUERRA J. P. et al. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. **Int J Life Cycle Assess**, v.19, p. 814–25, 2014.

HEIJUNGS R, SUH S. The Computational structure of Life Cycle Assessment. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.

IRUSTA, R., NUNEZ, Y.: Improving Eco-Design of Street Lighting Systems Using LCA. *In.*: LCM – 1<sup>st</sup>. International Conference on Life Cycle Assessment. Copenhagen. 2001.

JENSEN, A. A. (coord.): Life-Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources, Report to the European Environmental Agency, Copenhagen, 1997.

KULAY, L. et al. Environmental Comparison Of Conventional And Organic Technological Routes For Sugar Obtaining Concerning To Environmental Sustainability. In: Life Cycle Assessment VIII, 2008, Seattle. American Center On Life Cycle Assessment. v. 1. Seattle. 2008.

KULAY, L., SEO, E. S.M. Orientações conceituais para elaboração de inventários de ciclo de vida. Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente, v. 5, n. 1, Artigo 1, jan./abr. 2010.

MACEDO, I. C., SEABRA, J. E. A, SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass Bioenerg**, 2008

MONTEIRO, M. F. Avaliação do Ciclo de Vida do fertilizante superfosfato simples. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2008. 177 p.

NOGUEIRA, A. R. et al. (2014) Use of Environmental and Thermodynamic Indicators to Assess the Performance of an Integrated Process for Ethanol Production. **ENRR**, v. 4, p. 59-74.

PALACIOS-BERECHE, R. et al. New alternatives for the fermentation process in the ethanol production from sugarcane: Extractive and low temperature fermentation. **Energy**, v. 70, p. 595–604, 2014.

PARAÍZO, D. Sistemas de preparo do solo para plantio de cana. Cana-de-açúcar, Janeiro 13, 2013. Disponível em: <<http://www.novacana.com/cana/sistemas-preparo-solo-plantio-da-cana/>>. Acesso em: 10 de novembro 2016

PASSUELO, A. C. B. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em embalagens descartáveis para frutas: estudo de caso. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PEREIRA, S. W. Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos: Aplicação de avaliação do ciclo de vida. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004. 122 p.

RIBEIRO, P. H. Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. 343 p.

RONQUIM, C. C. Queimada na colheita de cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010 45 p.: il. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 77). ISSN 0103-78110.

SEABRA, J. E. A. et al. A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, p. 1065–1078, 2010.

SEABRA JEA ET AL. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, p. 519 – 532, 2011.

SEABRA, J.E.A.; MACEDO, I.C. Comparative analysis for Power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*, v.39, p.421-428, 2011.

SUGAWARA, E. T. Comparação dos desempenhos ambientais do B5 etílico de soja e do óleo diesel por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. 242 p.

TAKAHASHI, et al.: Evaluation of Environmental Impact of Wired Telecommunication Networks in Japan. *In: InLCA/LCM – Life Cycle Assessment/Life Cycle Management: a bridge to a sustainable future*. 2003. Seattle.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases: A basis for greener processes and products. Paris: United Nations Publication, 2011.

VIGON, B.W. (coordinator). Life-cycle assessment: inventory guidelines and principles. Cincinnati, RREL / USEPA, 1993. 108 p. (EPA 1600 / R-92 / 245).

ANTON, L. Análise de desempenho ambiental da cogeração de energia elétrica a partir de adições sucessivas de biomassa em destilaria autônoma. Documento de Qualificação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GUERRA, J.P. Avaliação de desempenho termodinâmico e ambiental de cenários de cogeração elétrica em usinas autônomas. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

FORSTER, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

FRISCHKNECHT, R., Jungbluth, N., Althaus, H.J., Doka, G., Dones, R., Hischer, R., Hellweg, S., Humbert, S., Margni, M., Nemecek, T., Spielmann, M., 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. ecoinvent report No. 3, Swiss centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. Available at: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)

GOEDKOOP, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., 2013. Description of the ReCiPe methodology for life assessment impact assessment. ReCiPe Main Report Revised July 13th, 2012. Available at: <http://www.lcia-recipe.net> (accessed on June, 2017).

HAUSCHILD, M.Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M., De Schryver, A., Humbert, S., Laurent, A., Sala, S., Pant, R., 2013. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 683–697.  
doi: 10.1007/s11367-012-0489-5

SÃO PAULO. *Protocolo de Cooperação: Governo do Estado de São Paulo e a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo para consolidação desenvolvimento sustentável da indústria da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo*. São Paulo, 04 de junho de 2007.  
Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/06/04\\_protocolo.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/06/04_protocolo.pdf)>. Acesso em: 1 ag. 2017.

Silva, D.A.L., Pavan, A.L.R., Oliveira, J.A., Ometto, A.R., 2015. Life cycle assessment of offset paper production in Brazil: hotspots and cleaner production alternatives. *J. Clean. Prod.* 93, 222-233.

doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.030