

4 Fluxos de materiais e de energia no ciclo de vida de produtos industriais¹

As indústrias são consideradas as grandes consumidoras de energia. Esse consumo é associado a todas as operações necessárias para suportar a fabricação de um produto ou a oferta de um serviço (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979).

As fontes de materiais e energia, dependendo do tipo de produto, são usadas com diferentes intensidades ao longo de todo o seu ciclo de vida. Isso quer dizer que a abordagem que leva em conta um projeto deve visar a redução do consumo de recursos em todas as fases, entre elas as fases de projeto e operacional. Material e energia têm um grande custo não só econômico, mas ambiental, e uma redução de seu uso é, portanto, uma fonte de economia. Projetar produtos que sejam facilmente reciclados é importante, mas isso deve ser feito após uma análise de ciclo de vida (ACV) completa do produto proposto (MANZINI; VEZZOLI, 2002).

A operação de uma fábrica deve ser levada em conta detalhadamente desde o início de sua análise energética. Poucas fábricas têm o consumo de energia monitorado para diferentes áreas de produção, sendo assim, a eficiência de energia de operações diferentes também é desconhecida. Conhecer o consumo em diferentes áreas de uma fábrica é útil pelas seguintes razões:

- 1) O custo da energia tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, assim a economia de energia é buscada por muitos gerentes de fábricas;
- 2) Se uma linha de produção nova ou modificada é proposta, o custo da energia precisa ser comparado com um processo existente;
- 3) Os gestores precisam de um método de apontamento dos custos da energia entre diferentes centro de custos para prover análise de energia detalhada em uma base realista.

Outra razão para haver interesse em análise de energia é o aumento da importância da análise do impacto ambiental. Os responsáveis pelas indústrias, envolvidos em cada análise de energia, estão interessados não somente na operação, mas também têm interesse direto na quantidade de energia bruta necessária para a produção do produto, independentemente do que o avaliador estiver calculando (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979).

A minimização do consumo de energia refere-se às intervenções que visam a redução, ou a otimização do consumo em todas as operações ligadas à obtenção de um produto, da

¹ Capítulo extraído de Romanelli, T. L. Incorporação de energia em sistemas de produção agrícola. Tese de Livre Docência, ESALQ/USP. Piracicaba, 2013. 109 p.

otimização dos parâmetros dos processos produtivos, a eficiência dos sistemas de armazenagem e movimentação dos materiais e componentes, a redução dos resíduos, a eficiência dos sistemas de aquecimento, a aeração e a iluminação no interior das fábricas. O projetista pode intervir na escolha dos processos produtivos de baixo consumo energético (MANZINI; VEZZOLI, 2002).

A minimização do consumo de energia e dos materiais se tornou uma prática comum, bem como: escolher os processos produtivos com menor consumo de energia; utilizar o calor disperso por algum processo produtivo para o pré-aquecimento de outros; otimizar os sistemas de controle de estoque; utilizar sistemas eficientes de aquecimento, aeração e iluminação das edificações.

Assim, o projetista tem um papel relevante na escolha e aplicação dos materiais empregados no produto, mesmo não estando envolvido com a origem ou com o fim desses materiais ao cessar o ciclo de vida do produto (MANZINI; VEZZOLI, 2002). As indicações para a escolha de fontes energéticas com baixo impacto seriam a escolha de fontes de energia renováveis; busca da minimização das emissões durante as fases de produção, distribuição e uso; busca da minimização dos resíduos.

O conceito do ciclo de vida refere-se às trocas (*input* e *output*) entre o ambiente e o conjunto de processos que acompanham o “nascimento” (projeto e obtenção), “vida” (duração) e a “morte” (descarte) de um produto. Assim, o produto é interpretado em relação aos fluxos de materiais, energia e efeitos no ambiente, das atividades que o acompanham durante todo o seu ciclo. No ciclo de vida considera-se o produto desde a extração dos recursos necessários para a produção dos materiais que o compõem (“nascimento”) até o último tratamento (“morte”) desses mesmos materiais após o uso do produto (MANZINI; VEZZOLI, 2002).

O ciclo de vida útil é uma sequência de fases relacionadas com um produto, processo, serviço instalação ou empresa, sendo diferenciado do ciclo de vida econômico e o físico. O primeiro, econômico, é uma sequência de atividades desde a concepção do produto, desenvolvimento, lançamento, fabricação, manutenção, reavaliação e retirada ao final de sua vida. O segundo, ciclo de vida físico, é uma série de transformações de materiais e energia desde a extração de matérias-primas, fabricação, distribuição, utilização, recuperação de materiais, reciclagem e reuso. Assim, o ciclo de vida útil significa a durabilidade de qualquer objeto, o intervalo de tempo entre o início do uso de um objeto até o seu descarte para reciclagem (FIKSEL, 1997).

A reutilização é um segundo uso dos produtos, ou de seus componentes, previamente descartados e eliminados. Os produtos destinados à reutilização precisam ser recolhidos e, sem maiores operações, encaminhados ao mesmo uso ou a outro com menos requisitos. As alterações necessárias para promover a reutilização devem ser poucas e limitarem-se, por exemplo, à limpeza ou à desmontagem e recondução de alguns componentes para os novos produtos. Algumas indicações para facilitar a reutilização seriam: melhorar a resistência das partes mais sujeitas a avarias e rupturas; predispor o acesso para facilitar a remoção das partes e componentes que podem ser reutilizados e projetar partes e componentes intercambiáveis, modulares e padronizados; projetar prevendo um segundo uso (MANZINI; VEZZOLI, 2002). Assim, esses autores concluem que estender a vida dos materiais significa fazê-los viver por mais tempo do que duram os produtos que esses materiais estão compondo. Esse ciclo “do berço ao berço” dos materiais ocorre por meio de dois processos fundamentais, ou seja, os materiais podem ser reprocessados para serem transformados em materiais secundários.

4.1 Fluxos de materiais e de energia na colhedora de cana-de-açúcar

Durante as décadas 1980 e 1990, o setor sucroalcooleiro dependia quase exclusivamente da mão-de-obra para realizar o corte manual da cana-de-açúcar. A mecanização favoreceu a melhoria no processo de colheita, processo no qual se emprega com maior frequência as colhedoras autopropelidas, para realizar o corte da planta (OLICANA, 2010). Adicionalmente, houve um aumento na área de produção de cana-de-açúcar dentre outros fatores pela mudança climática global, que exige medidas para evitar o agravamento das condições ambientais e a conseqüente queda da qualidade de vida da população, entre as quais o estímulo ao uso de combustíveis de fontes renováveis (UNICA, 2010).

A determinação da energia incorporada na colhedora autopropelida de cana-de-açúcar é a forma de se conhecer a quantidade de energia gasta pela colhedora no sistema de colheita mecanizada, podendo ser utilizado posteriormente, para recalcular o balanço energético do etanol de cana-de-açúcar. A produção de máquinas agrícolas quando avaliada visando determinar impactos ambientais é baseada nos fluxos de materiais, bem como, a análise dos fluxos de energia (DYER; DESJARDINS, 2006; ROMANELLI; MILAN, 2010a).

A aplicação da análise de energia produz informações completas e o mapeamento do fluxo de energia é essencial para previsão de demandas futuras. A análise de energia é

realizada sobre a energia usada e assim pode ser considerada como a descrição dos processos industriais no mundo real (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979).

Doering (1980) estimou a energia incorporada em máquinas agrícolas e propôs um método de alocar o consumo de energia no processo de produção. O método desenvolvido define três categorias de energia, que são calculadas separadamente antes de serem somadas no total de energia associada a um componente da máquina agrícola. As três categorias de energia são: A energia incorporada nos materiais que entram em uma peça da máquina; a energia usada na fabricação, para dar forma aos materiais e fabricar as peças da máquina; e ambas as categorias (incorporada e fabricada) no reparo das peças e materiais, que seriam aplicados numa peça da máquina, por meio de seu ciclo de vida útil.

O maquinário agrícola moderno contém muitas peças construídas de materiais sintéticos, por exemplo, tanques, peças metálicas, engrenagens, mangueiras, juntas moldadas, rodas de compactação de semeadoras e assim por diante. Assim, a análise de demanda de energia para fabricação, manutenção e reparo, é difícil de ser realizada, pois existem poucos dados de pesquisas disponíveis (AHOKAS; MIKKOLA, 2007). O cálculo de energia primária, exigida para fabricação da matéria prima é relativamente recente (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979).

A tendência dos sistemas de produção de se tornar mais eficiente pode não ser verdadeira sob a ótica da demanda de energia, em função da ampla utilização de materiais como fibra de vidro, polímeros e alumínio em veículos automotores. Tais materiais apresentam mais energia incorporada que o aço (MIKKOLA; AHOKAS, 2010).

As máquinas agrícolas, assim como quaisquer equipamentos ou infraestrutura que são utilizadas indiretamente em um processo, têm sua demanda energética determinadas de forma imprecisa (DOERING, 1980; ROMANELLI, 2009b). Um grande número de dados é necessário para uma avaliação da energia incorporada em um estoque de máquinas (DOERING, 1980; MIKKOLA; AHOKAS, 2010). Por exemplo, para se determinar a energia incorporada em um bloco de um motor de combustão interna, é necessário determinar a energia demandada na mineração, no transporte do minério de ferro, na fornalha utilizada na transformação e ainda seria necessário analisar todos os processos de fabricação das peças, de montagem e de venda (DOERING, 1980).

Berry e Fels (1972) foram pioneiros em indicar um índice energético para veículos automotores, baseando seus dados originais na produção da indústria automobilística de Chicago em 1967. Eles analisaram o fluxo de material para determinar o índice energético dos

veículos automotores em pequenos componentes e calcularam que $81,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ de energia primária foram necessários para a fabricação de um automóvel com massa aproximada de 1.653 kg. Identificaram que a demanda de energia para os materiais como o ferro e aço foi mais exata do que para os materiais não ferrosos. Os itens de tapeçaria foram completamente omitidos da análise. Os componentes de aço e ferro contabilizaram 94% da massa do automóvel na análise dos fluxos de materiais e energia.

Embora não tenham feito uma comparação entre a indústria automobilística e a de máquinas agrícolas, Deleage et al. (1979), adaptaram o índice de Berry e Fels (1972), baseando-se no fato de que o material consumido no processo de fabricação de um trator é diferente do material consumido no processo de um automóvel. Levando em conta a proporção dos materiais ferrosos, não ferrosos e outros materiais, que existiam nos equipamentos, calcularam um valor médio de $75,0 \text{ MJ kg}^{-1}$ para as máquinas agrícolas na França na década de 1970.

Macedônio e Picchioni (1985) calcularam que $69,9 \text{ MJ kg}^{-1}$ foi a demanda específica de energia, necessária para a fabricação de uma colhedora de grãos com potência de 80 kW (109 cv) com massa aproximada de 5.600 kg e ciclo de vida útil de 10.000 horas. A demanda específica de energia, necessária para a fabricação de uma semeadora de fluxo contínuo (sementes miúdas) com 13 linhas, massa aproximada de $150 \text{ kg linha}^{-1}$ e ciclo de vida útil de 10.000 horas, foi de $57,2 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Uma análise comparativa do uso de energia entre a indústria automobilística e a indústria de máquinas agrícolas não foi feita. Essa análise deveria ter sido realizada, porque há diferenças estruturais essenciais entre automóveis e tratores, o que poderia inviabilizar assumir alguma semelhança entre automóvel e máquinas agrícolas. Os tratores são construídos por muitos componentes de ferro fundido, enquanto a carcaça de um carro é invariavelmente construída de chapa de aço (MIKKOLA; AHOKAS, 2010). Os tratores, como a maioria de outras máquinas agrícolas, consistem hoje de componentes que são fabricados por fornecedores. (AHOKAS; MIKKOLA, 2007).

Macedônio e Picchioni (1985) relatam que o cálculo da quantidade de energia fóssil embutida em um trator, colhedora ou implemento agrícola, foi efetuado a partir do conhecimento da massa, ciclo de vida útil e da demanda específica de energia por tonelada de cada uma dessas máquinas e equipamentos fabricados no Brasil. A demanda específica de energia foi calculada de acordo com a metodologia definida por Julien (1984) apud Macedônio e Picchioni (1985) que tem como base de cálculo a produção de materiais pelas

siderúrgicas. Assim, o ano considerado como ano médio de fabricação dos equipamentos foi 1975 e conhecendo as informações sobre a produção nacional de materiais nessa data, calculou-se a quantidade de energia necessária para a produção de máquinas e implementos. Macedônio e Picchioni (1985) afirmam que, os insumos fabricados mais recentemente, têm demanda específica de energia menor que a calculada. Sabe-se que o desenvolvimento de novas tecnologias no setor metalúrgico, reduziu o consumo energético necessário para a produção. Assim, quanto mais modernos os equipamentos, menor será a quantidade de energia fóssil embutida neles.

4.2 Fases de montagem, manutenção e reparo sugerido pela montadora para a colhedora de cana-de-açúcar

Visando estabelecer um índice de incorporação de energia em máquinas agrícolas, que retratasse a demanda de materiais, diferentemente das referências, a energia incorporada em colhedoras autopropelidas de cana-de-açúcar foi determinada, durante o seu ciclo de vida útil. Para tanto, primeiramente os fluxos de materiais foram contabilizados, quantificando fisicamente os insumos consumidos pela colhedora, conforme Romanelli e Mantoam (2012). Nesse estudo, não se considera a energia da colhedora operando, e sim da colhedora pronta para operar, pois não contemplou o consumo de combustível pela colhedora.

Duas colhedoras autopropelidas de cana-de-açúcar foram avaliadas: a) uma colhedora, denominada máquina 1, com massa de 14.863 kg, equipada com rodas e pneus; b) uma colhedora, denominada máquina 2, com massa de 16.972 kg equipada com esteiras metálicas. Ambas as máquinas são equipadas com um motor de ciclo diesel, seis cilindros em linha, injeção direta, alimentação forçada e pós-refrigerado por carga de ar, com potência de 260 kW (354 cv) e rotação máxima 2100 rpm.

O levantamento dos dados necessários para a execução do estudo foi feito junto a uma montadora, localizada na região de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil. O primeiro passo foi definir o fluxograma (1²) (Figura 1), que abordou a fase de montagem (2) e a fase de manutenção e reparo (3).

A fase de montagem (2) engloba os insumos indiretamente (4) e os diretamente utilizados (5). Os indiretamente utilizados correspondem aos insumos que não compõem fisicamente a máquina, sendo classificados como insumos comuns (7) e insumos depreciados

² Os números entre parênteses referem aos dados da Figura 1.

(8). Os comuns dizem respeito à eletricidade, gás liquefeito de petróleo, água e os depreciados dizem respeito às instalações, ferramentas e infraestrutura. Os insumos diretamente utilizados (5) contemplam as peças que compõe a máquina já pronta ao final da montagem. A fase de reparo e manutenção (3) contempla os insumos gastos nessa fase (6), como filtros, óleo lubrificante, peças em geral, mão-de-obra entre outros.

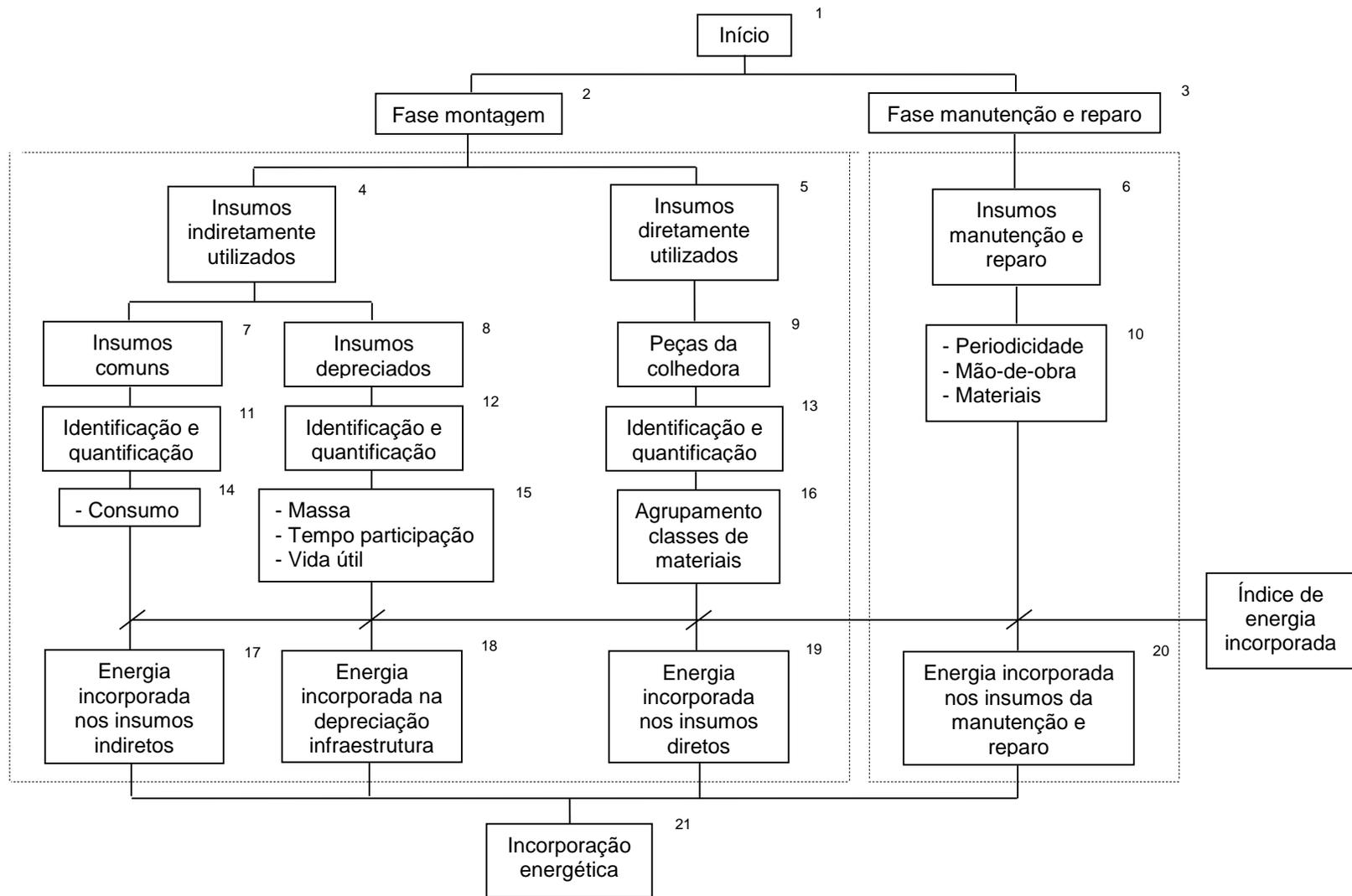


Figura 1 – Fluxograma da determinação da energia incorporada na colhedora de cana-de-açúcar (ROMANELLI; MANTOAM, 2012)

Na fase de manutenção e reparo, foram utilizadas as manutenções propostas pelo manual do proprietário. Dados sobre mecanismos que sofrem desgastes, por exemplo, picadores, foram obtidos junto ao departamento de Engenharia de Protótipos e Testes da montadora de colhedoras de cana-de-açúcar, uma vez que variam muito em função das condições de campo e da manutenção realizada (6). As planilhas eletrônicas utilizadas para os cálculos foram desenvolvidas utilizando o *software* Microsoft Excel® 2007.

A identificação e quantificação dos insumos indiretamente utilizados (11) foram feitas baseadas no levantamento do consumo médio desses insumos ao longo de 36 meses, entre 2008 e 2010. Assim para encontrar o consumo específico desses insumos para uma colhedora, primeiramente foi encontrado a participação da colhedora dentro do total de máquinas produzidas, para um determinado ano (Equação 1). A montadora na qual foi feito o levantamento possui linhas de montagem de outras três máquinas agrícolas.

As horas necessárias de mão-de-obra para realizar a montagem da colhedora, foram baseadas no cadastrado de horas no banco de dados da empresa.

$$PCP = (UCP_i * TGC_i * 100) / \sum TP_i \quad (1)$$

Em que: PCP = participação da colhedora dentro do total de máquinas produzidas no i-ésimo ano (%); UCP = unidades de colhedoras produzidas no i-ésimo ano; (unidades ano⁻¹); TGC = tempo gasto para produzir uma colhedora (h unidade⁻¹); $\sum TP$ = somatório do tempo total de produção da empresa no i-ésimo ano (h ano⁻¹); i = ano.

Com o dado da participação de colhedoras produzidas por ano, multiplicado pelo consumo do insumo anual e dividido pela unidade de colhedoras produzidas, resulta o consumo do insumo médio anual da colhedora, para um determinado ano (Equação 2).

$$CMA_i = ((PCP / 100) * CIA_i) / UCP_i \quad (2)$$

Em que: CMA = consumo do insumo médio no i-ésimo ano (kWh unidade⁻¹; m³ unidade⁻¹; kg unidade⁻¹; L unidade⁻¹); CIA = consumo do insumo no i-ésimo ano (kWh ano⁻¹; m³ ano⁻¹; kg ano⁻¹; L ano⁻¹).

Assim, o consumo médio total foi determinado somando-se o consumo médio anual referente aos anos de 2008, 2009 e 2010 e dividindo-os pela quantidade de anos avaliados. Isso identificou o consumo médio total para cada insumo, por unidade de colhedora produzida (Equação 3).

$$\text{CMT} = \sum \text{CMA}_i / N \quad (3)$$

Em que: CMT = consumo médio total (kWh unidade⁻¹; m³ unidade⁻¹; kg unidade⁻¹; L unidade⁻¹); N = número de anos avaliados; i = ano.

Os dados de consumo médio total (14), multiplicados pelo seu índice de energia incorporada, resultam na energia incorporada nos insumos indiretos (17) (Equação 4). O Anexo A apresenta os índices de energia incorporada dos insumos utilizados. Para os insumos que não tiveram encontrado os seus respectivos índices de energia incorporada, foram adotados índices de insumos similares, de modo a abranger todos os insumos identificados no processo de fabricação da colhedora autopropelida de cana-de-açúcar.

$$\text{EIII} = \text{CMT} * \text{EI} \quad (4)$$

Em que: EIII = energia incorporada nos insumos indiretos (MJ); EI = energia incorporada do material (MJ kg⁻¹; MJ m⁻³; MJ unidade⁻¹).

Os insumos que são depreciados no processo produtivo são contemplados pelos insumos indiretamente utilizados (4). São eles: alvenaria, máquinas, equipamentos e ferramentas (8). Esses insumos não têm o seu consumo de forma comum na empresa fabricante de colhedoras, uma vez que essa empresa fabrica também outras máquinas agrícolas.

A identificação e a quantificação (12) foram feitas para que a massa e a vida útil desses insumos fossem determinadas e também para que os insumos auxiliares ao seu funcionamento, como, óleo lubrificante, fossem incluídos na determinação do fluxo de materiais. Assim, o cálculo de consumo médio desses insumos, para a colhedora, foi feito em função da taxa de utilização que corresponde à porcentagem de colhedoras produzidas ao longo de 36 meses, entre 2008 e 2010. Isso indicou a taxa de utilização para cada insumo por unidade de colhedora (Equação 5).

$$TUI = \sum (PCP_i \times 100) / N \quad (5)$$

Em que: TUI = taxa de utilização dos insumos (%); PCP = participação da colhedora dentro do total de máquinas produzidas no i-ésimo ano (%); N = número de anos avaliados; i = ano.

Com o dado da taxa de utilização dos insumos, multiplicado pela área da infraestrutura utilizada, considerando as seções de expedição; armazém de peças; centro treinamento; além dos equipamentos de informática (quantificados pela massa), foi determinado o consumo médio para cada insumo depreciado por unidade de colhedora produzida (Equação 16).

$$CMD = (TUI / 100) * IEU \quad (6)$$

Em que: CMD = consumo médio depreciado (m²; kg); IEU = infraestrutura utilizada (m²; kg).

Com os dados de consumo médio depreciado, vida útil e conhecendo-se o tempo de participação (15) que um determinado equipamento tem no processo produtivo, chegou-se à massa depreciada relativa à fabricação da colhedora, que multiplicados pelo seu índice de energia incorporada, resulta na energia incorporada na depreciação da infraestrutura (18) (Equação 7).

$$EIDI = ((CMD / VU) * TC) * EI \quad (7)$$

Em que: EIDI = energia incorporada na depreciação da infraestrutura (MJ); VU = vida útil da i-ésima máquina, ferramenta, prédio (h); TC = tempo de ciclo gasto pela máquina, ferramenta e prédio na fabricação de uma colhedora (h).

A vida útil para os insumos indiretamente utilizados, que são depreciados no processo produtivo, foi baseada na Instrução Normativa SRF 162 (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 1998), definindo que ferramentas leves teriam cinco anos de vida útil (43800 h), equipamentos de grande porte 10 anos de uso (87600 h) e construções, 25 anos (219000 h). Para equipamentos de informática adotou-se cinco anos (43800 h).

Os insumos diretamente utilizados (5) são as peças que compõem a colhedora (9). A sua identificação e quantificação (13) foram feitas com os dados técnicos que estão cadastrados no banco de dados da empresa (matéria-prima, massa e quantidade). As peças utilizadas nas colhedoras foram agrupadas por classes de materiais, referentes à composição da matéria-prima de cada peça, como aço carbono, ferro fundido, alumínio, cobre, borracha, plástico, e outros (16). Os dados técnicos destas peças (16) multiplicados pelo seu índice de energia incorporada, resultam na energia incorporada nos insumos diretos (19) (Equação 8).

$$EIID = \sum FM * EI \quad (8)$$

Em que: EIID = energia incorporada nos insumos diretos (MJ); FM = fluxo do i-ésimo material (kg; L).

Para uma melhor organização dos fluxos desses materiais, os materiais foram classificados em quatro classes, de acordo com as suas características (SENAI, 1996): metálicos; não metálicos; lubrificantes/fluídos; tintas/solventes.

A periodicidade das trocas e as atividades propostas de manutenção e reparo foram utilizadas (10), a fim de determinar o consumo dos insumos, como filtro, graxa, óleo, faca de corte, material rodante, bem como, as horas de mão-de-obra necessárias para realizar as respectivas atividades de manutenção e reparo. Os dados dos fluxos de materiais utilizados (10) multiplicados pelo seu índice de energia incorporada, resulta na energia incorporada nos insumos da manutenção e reparo (20) (Equação 9).

$$EIMR = \sum FM * EI \quad (9)$$

Em que: EIMR = energia incorporada nos insumos da manutenção e reparo (MJ).

A soma dos resultados da fase de montagem (2) e da fase de manutenção e reparo (3) resulta na incorporação energética da colhedora autopropelida ao longo do ciclo de vida útil (21) (Equação 10).

$$EIC = EIII + EIDI + EIID + EIMR \quad (10)$$

Em que: EIC = energia incorporada na colhedora autopropelida ao longo do ciclo de vida útil (MJ).

Com o dado da energia incorporada na colhedora autopropelida, e conhecendo o seu ciclo de vida útil, resulta no indicador que relaciona energia demandada por hora de vida útil (Equação 11). Com o dado da energia incorporada na colhedora autopropelida, e conhecendo a sua massa, se estabelece o indicador energia incorporada pela massa (Equação 12). Com o dado da energia incorporada na colhedora autopropelida, e conhecendo a potência bruta, se estabelece o indicador energia incorporada pela potência do motor (Equação 13).

$$IEIH = EIC / CVU \quad (11)$$

$$IEIM = EIC / MA \quad (12)$$

$$IEIP = EIC / PM \quad (13)$$

Em que: IEIH = indicador de energia incorporada pelo ciclo de vida útil (MJ h^{-1}); CVU = ciclo de vida útil da colhedora (h); IEIM = indicador de energia incorporada pela massa (MJ kg^{-1}); MA = massa da colhedora (kg); IEIP = indicador de energia incorporada pela potência do motor (MJ kW^{-1}); PM = potência do motor da colhedora (kW).

O ciclo de vida útil para a colhedora autopropelida de cana-de-açúcar corresponde a uma média de 3.100 horas trabalhadas por ano, que ao ser multiplicada por um período médio de sete anos de trabalho, resultou no ciclo médio de vida útil da colhedora autopropelida de cana-de-açúcar de 21.700 horas trabalhadas. Banchi, Lopes e Zago (2008) concluem que os períodos do uso anual das colhedoras de cana-de-açúcar variam conforme as exigências de trabalho das usinas de cana-de-açúcar, em que a média varia de 2.000 a 4.000 horas de uso, por ano. Para cada insumo representado por sua unidade (m^3 , kWh, kg, L, h, m^2), foi obtido o seu respectivo índice de energia incorporada em referências, que estão no Anexo A.

A Tabela 1 apresenta a energia incorporada para as máquinas 1 e 2, ao longo do ciclo de vida útil. A maior quantidade de energia incorporada obtida foi para os insumos da manutenção e reparo 2.167,7 GJ (72,0%) para a máquina 1 e 2.523,3 GJ (72,8%) para a máquina 2.

A energia incorporada diretamente nos insumos (924,8 GJ), e na manutenção e reparo (2.523,3 GJ) é maior para a máquina 2 do que para a máquina 1 (824,8 GJ e 2.167,7 GJ, respectivamente). Isso é justificado devido o tipo do rodante usado pela máquina 2 (esteiras metálicas, massa aproximada de 4.611 kg) em relação ao rodante da máquina 1 (rodas e pneus, massa aproximada de 737 kg).

Em relação ao total de energia incorporada 3.011.893,8 MJ para a máquina 1 e 3.467.495,2 MJ para a máquina 2, os insumos incorporados indiretamente (insumos comuns e insumos depreciados) no processo produtivo obtiveram porcentagem menor que 1% do total de energia incorporada para ambas as máquinas.

Tabela 1 – Energia incorporada nas máquinas 1 e 2 ao longo do ciclo de vida útil

Entrada	Energia incorporada			
	Máquina 1		Máquina 2	
	MJ	%	MJ	%
1. Insumos manutenção e reparo	2.167.656,8	72,0	2.523.304,7	72,8
2. Insumos diretamente	824.858,7	27,4	924.812,2	26,7
3. Insumos indiretamente (insumos comuns)	18.819,0	0,6	18.819,0	0,5
4. Insumos indiretamente (insumos depreciados)	559,3	0,0	559,3	0,0
Total	3.011.893,8	100,0	3.467.495,2	100,0

A Tabela 2 apresenta os indicadores de energia incorporada das máquinas 1 e 2. O indicador energia incorporada pelo ciclo de vida útil pode ser usado para recalculer o balanço energético do etanol de cana-de-açúcar. O indicador energia incorporada pela massa pode ser usado para comparações com índices de outras máquinas. O indicador energia incorporada pela potência do motor tem como finalidade comparar a energia incorporada baseado na potência requerida do motor do maquinário agrícola. Os indicadores energia incorporada pelo ciclo de vida útil e pela potência do motor para a máquina 2, com massa aproximada de 16.972 kg (rodante de esteiras metálicas), é 15,13% maior, em relação à máquina 1 com massa aproximada de 14.863 kg (rodante de rodas e pneus). Assim, os indicadores energia incorporada pelo ciclo de vida útil, pela massa e pela potência do motor, para a máquina 2, são maiores em relação a máquina 1, +15,13%; +0,84%; +15,13%, respectivamente.

Tabela 2 – Indicadores de energia incorporada das máquinas

Indicador	Unidade	Energia incorporada	
		Máquina 1	Máquina 2
Na vida útil	MJ h ⁻¹	138,8	159,8
Na massa	MJ kg ⁻¹	202,6	204,3
Na potência bruta	MJ kW ⁻¹	11.584,2	13.336,5

A Tabela 3 apresenta a energia incorporada nos insumos utilizados na manutenção e reparo durante o ciclo de vida útil das máquinas 1 e 2. Para a máquina 1 o aço carbono foi o insumo que representou a maior quantidade 1.288.050,6 MJ (59,4%), seguido pela borracha 223.178,2 MJ (10,3%). Para a máquina 2 o aço carbono foi o insumo que representou a maior quantidade 1.314.560,8 MJ (52,1%), seguido pelo aço forjado 312.173,3 MJ (12,4%) e ferro fundido nodular 237.035,3 MJ (9,4%).

A energia humana requerida para desempenhar alguma atividade é baixa se comparada com as outras categorias de energia, como relatado por Bridges e Smith (1979). Nesse trabalho, a energia humana requerida na montagem foi de 279,5 MJ (Tabela 10) e na manutenção e reparo foi de 10.402,7 MJ e 11.013,6 MJ para a máquina 1 e 2 respectivamente (Tabela 3).

O consumo de 3.536,3 L de óleo diesel resultou em 168.964,3 MJ. O óleo diesel é consumido pelo “caminhão bombeiro” empregado no processo de lavagem programada da colhedora, com frequência diária. Vale à pena estudar, em novos projetos de pesquisa, o processo de lavagem da colhedora, para que se encontrem alternativas para sua limpeza, como por exemplo, limpeza por meio de jato de ar comprimido, fornecido por um compressor de ar instalado na colhedora, eliminado assim, o consumo de água e óleo diesel no processo de lavagem.

Dos 2.536,1 kg de borracha consumida pela máquina 1, 1.851,73 kg são exclusivamente dos pneus da colhedora, sendo o restante consumido pelas mangueiras hidráulicas, flap do elevador, arremessador do rolo picador e anéis de vedação.

O consumo de 3.959,1 kg de aço forjado pela máquina 2, é exclusivo das esteiras metálicas, e dos 7.257,7 kg de ferro fundido nodular, 6.342,1 kg foram exclusivamente consumidos pelas esteiras metálicas, sendo o restante consumido pelos alojamentos dos rolos.

A mão-de-obra resultou em 10.402,7 MJ (0,5%) para a máquina 1 e 11.013,6 MJ (0,4%) para a máquina 2.

Tabela 3 – Energia incorporada na manutenção e reparo na vida útil das máquinas

Insumos	Unid.	Energia incorporada MJ unid. ⁻¹	Material e energia incorporados nos insumos					
			----- Máquina 1 -----			----- Máquina 2 -----		
			Material Unid.	Energia MJ	%	Material Unid.	Energia MJ	%
Aço carbono	kg	51,52	25.001,0	1.288.050,6	59,4	25.515,5	1.314.560,8	52,1
Aço forjado	kg	78,85	-	-	0,0	3.959,1	312.173,3	12,4
Ferro fundido nodular	kg	32,66	915,5	29.901,0	1,4	7.257,7	237.035,3	9,4
Óleo diesel	L	47,78	3.536,3	168.964,3	7,8	3.536,3	168.964,3	6,7
Óleo hidráulico	L	37,28	3.255,0	121.346,4	5,6	3.255,0	121.346,4	4,8
Óleo lubrificante	L	37,28	2.564,3	95.596,4	4,4	2.564,3	95.596,4	3,8
Óleo motor	L	37,28	2.318,4	86.430,0	4,0	2.318,4	86.430,0	3,4
Graxa	kg	43,38	1.914,6	83.056,9	3,8	1.554,7	64.444,2	2,7
Borracha	kg	88,00	2.536,1	223.178,2	10,3	587,9	51.737,5	2,1
Polietileno	kg	52,45	789,0	41.381,8	1,9	789,0	41.381,8	1,6
Outros*								1,1
Subtotal	MJ			2.167.656,8	100,0		2.523.304,7	100,0

* Filme celulose, mão-de-obra, polipropileno, fio de aço e fibra de vidro inorgânica.

A tendência dos sistemas de produção de se tornarem mais eficientes pode não ser verdadeiramente em termos energéticos, em função de materiais apresentarem mais energia incorporada que o aço (MIKKOLA; AHOKAS, 2010). Isso ficou evidente nesse trabalho, por exemplo, nos insumos diretamente da montagem (Tabela 4). Para a máquina 1, o consumo de 430,2 kg de alumínio resultou em 99.382, 2 MJ, enquanto que o consumo de 2.255,9 kg de ferro fundido nodular resultou em 73.677,7 MJ. Assim, o consumo de ferro fundido nodular foi aproximadamente cinco vezes maior do que o consumo de alumínio.

A Tabela 4 apresenta a energia incorporada nos insumos diretamente utilizados na montagem das máquinas 1 e 2. Para a máquina 1 o aço carbono foi o insumo que

representou a maior quantidade de energia incorporada 520.949,6 MJ (63,2%), seguido do alumínio 99.382,2 MJ (12,0%). Para a máquina 2 o aço carbono foi o insumo que teve a maior quantidade de energia incorporada 492.427,1 MJ (53,2%), seguido pelo ferro fundido nodular 125.514,3 MJ (13,6%) e aço forjado 123.231,5 MJ (13,3%). O ferro fundido nodular e o aço forjado são provenientes das esteiras metálicas.

O consumo de 177,8 kg de polietileno alta densidade por unidade de colhedora máquina 1 resultou em um alto valor de energia incorporada 9.323,1 MJ, quando comparado, por exemplo, com 155,9 kg (2.977,8 MJ) de fio de aço. O fio de aço é utilizado no corpo das mangueiras hidráulicas, para garantir resistência contra a ruptura.

O consumo de 33,7 kg de chumbo resultou em um baixo valor de energia incorporada 584,0 MJ, quando comparado, por exemplo, com 10,7 kg (1.178,7 MJ) de espuma de poliuretano. O chumbo é utilizado na bateria, e a espuma de poliuretano na cabine da colhedora.

O consumo de 12,3 kg de vidro laminado resultou em 370,4 MJ. O vidro laminado também é usado na cabine da colhedora. O consumo de 5,0 kg de graxa resultou em 216,9 MJ para a máquina 1 e de 8,0 kg em 347,0 MJ para a máquina 2. A graxa é usada para lubrificar os pontos de atrito sólido e reduzir o desgaste entre as superfícies, proporcionando maior ciclo de vida útil da peça ou objeto.

Por outro lado, quando se emprega materiais reciclados a quantidade de energia incorporada no produto é reduzida, pois há economia de energia nas fases de extração e transformação da matéria-prima, não afetando a qualidade e características do produto. Por exemplo, o consumo de 16,0 kg de ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) reciclado resultou em 19,8 MJ.

Comparando-se o consumo de 16,0 kg (19,8 MJ) de ABS reciclado, com o consumo de 10,7 kg (1.178,7 MJ) de espuma de poliuretano, se torna evidente a importância do uso de materiais reciclados, para a redução do consumo de energia incorporada no produto e dar enfoque para o maior e mais discutido problema ambiental global que é a queima de combustíveis fósseis, proporcionando o aquecimento da atmosfera da Terra.

Tabela 4 – Energia incorporada nos insumos diretamente utilizados na montagem

Insumos	Unid.	Energia incorporada MJ unid. ⁻¹	Material e energia incorporados nos insumos					
			----- Máquina 1 -----			----- Máquina 2 -----		
			Material Unid.	Energia MJ	%	Material Unid.	Material MJ	Energia %
Aço carbono	kg	51,52	10.111,6	520.949,6	63,2	9.558,0	492.427,1	53,2
Ferro fundido	kg	32,66	2.255,9	73.677,7	8,9	3.843,1	125.514,3	13,6
Aço forjado	kg	78,85	-	-	0,0	1.562,9	123.231,5	13,3
Alumínio	kg	231,00	430,2	99.382,2	12,0	418,0	96.561,0	10,4
Borracha	kg	88,00	812,6	71.508,8	8,7	304,9	26.833,5	2,9
Óleo hidráulico	L	37,28	600,0	22.368,0	2,7	600,0	22.368,0	2,4
Polietileno	kg	52,45	177,8	9.323,0	1,1	177,8	9.323,0	1,0
Cobre	kg	140,00	54,7	7.659,7	0,9	54,8	7.678,6	0,8
Polipropileno	kg	110,16	59,9	6.598,5	0,8	61,9	6.816,4	0,7
Óleo diesel	L	47,78	71,3	3.405,8	0,4	71,3	3.405,8	0,4
Outros*								1,1
Subtotal	MJ			824.858,7	100,0		924.812,2	100,0

*Outros: fio de aço, bronze, chumbo, espuma poliuretano, poliuretano, filme celulose, óleo motor, óleo lubrificante, aço inox, latão, vidro laminado, gás tetrafluoroetano, papel (impressão notícia), fibra vidro+alumínio, fibra têxtil reciclado, PVC, nylon 6.6, fibra sintética algodão, ABS reciclado, ácido sulfúrico, pó químico ABS, nitrogênio gasoso, fibra vidro inorgânica, graxa, anticorrosivo, tinta e solvente.

A Tabela 5 apresenta o fluxo de material diretamente utilizado na montagem das máquinas 1 e 2, exceto para o material rodante. Assim, analisar o fluxo de material dos rodantes separadamente do fluxo de material diretamente utilizado (Tabela 5) se torna importante para futuros estudos.

O aço carbono foi o insumo que representou a maior quantidade utilizada, 9.886,2 kg para máquina 1 em relação à máquina 2 (8.199,3 kg) por unidade de colhedora.

O alumínio obteve 430,2 kg para a máquina 1 e 418,0 kg para a máquina 2. O principal uso do alumínio é para a fabricação dos radiadores de água e óleo (uma vez que o alumínio é adequado para aplicações em equipamento destinado a permutar calor). Para os demais insumos, os valores obtidos foram próximos comparando-se as duas máquinas.

Tabela 5 – Fluxos de materiais diretamente utilizado na montagem das máquinas (exceto rodantes)

Entrada	Unidade	Fluxo de material	
		Máquina 1	Máquina 2
1 Materiais Metálicos			
1.1 Metais Ferrosos			
Aço carbono	kg	9.886,2	8.199,3
Ferro fundido nodular	kg	2.255,9	2.153,2
Fio de aço	kg	155,9	170,6
Aço inox	kg	1,7	1,7
1.2 Metais Não Ferrosos			
Alumínio	kg	430,2	418,0
Cobre	kg	54,7	54,8
Chumbo	kg	33,7	33,7
Bronze	kg	6,2	6,2
Latão	kg	1,3	1,3
2 Materiais Não Metálicos			
Borracha	kg	300,6	304,9
Polietileno alta densidade	kg	177,8	177,8
Polipropileno	kg	59,9	61,9
Fibra vidro+alumínio	kg	16,5	16,5
ABS reciclado	kg	16,0	16,0
Vidro laminado	kg	12,3	12,3
Espuma poliuretano	kg	10,7	10,7
PVC	kg	8,4	8,4
Ácido sulfúrico	kg	5,6	5,6
Poliuretano	kg	4,9	4,9
Pó químico ABC	kg	4,0	4,0
Gás tetrafluoroetano	kg	3,7	3,7
Papel (impressão de notícia)	kg	3,6	3,6
Nitrogênio gasoso	kg	3,1	8,0
Filme celulose	kg	2,5	2,5
Fibra têxtil reciclado	kg	2,2	2,2
Nylon 6.6	kg	1,7	2,1
Fibra sintética algodão	kg	0,6	0,6
Fibra vidro inorgânica	kg	0,1	0,1
3 Lubrificantes/Fluídos			
Óleo hidráulico	L	600,0	600,0
Óleo diesel	L	71,3	71,3
Óleo motor	L	25,0	25,0
Óleo lubrificante	L	20,8	27,0
Graxa	kg	5,0	8,0
Anticorrosivo	L	1,0	1,0
4 Tintas/Solvente			
Tinta	L	20,0	21,0
Solvente	L	5,0	5,2

A Tabela 6 apresenta o fluxo de material diretamente utilizados nos rodantes das máquinas 1 e 2; sendo a máquina 1 com rodas e pneus; máquina 2 com esteiras metálicas

A participação do aço carbono (225,4 kg) e borracha (512,0 kg) para a máquina 1 são provenientes da fabricação dos aros e pneus respectivamente e quantidade de 1.689,9 kg de ferro fundido nodular é proveniente do material rodante das esteiras da máquina 2.

Tabela 6 – Fluxos de materiais dos rodantes diretamente utilizados nas máquinas

Entrada	Unidade	Fluxo de material	
		Máquina 1	Máquina 2
Borracha	kg	512,0	-
Aço carbono	kg	225,4	1.358,7
Ferro fundido nodular	kg	-	1.689,9
Aço forjado	kg	-	1.562,9

A Tabela 7 apresenta o fluxo de material utilizado na manutenção e reparo durante o ciclo de vida útil das máquinas 1 e 2, exceto para o material rodante.

O aço carbono foi o insumo que representou a maior quantidade de consumo durante o ciclo de vida útil. Isso é observado em função do aço carbono ser a matéria-prima principal para a fabricação das peças que compõem a colhedora.

A participação do óleo diesel, 3.536,3 L por unidade de colhedora, é proveniente da lavagem programada diária da colhedora. A participação do filme de celulose 73,2 kg por unidade de colhedora, é resultante do consumo do elemento filtrante empregado nos filtros de sucção de ar, de combustível, de óleo, e de separação de água do combustível.

Tabela 7 – Fluxos de materiais da manutenção e reparo na vida útil das máquinas (exceto rodantes)

Entrada	Unidade	Fluxo de material	
		Máquina 1	Máquina 2
1 Mão-de-obra			
Mão-de-obra	h	4.710,4	4.794,6
2 Materiais Metálicos			
2.1 Metais Ferrosos			
Aço carbono	kg	25.001,0	24.974,4
Ferro fundido nodular	kg	915,5	915,5
Fio de aço	kg	68,5	12,9
3 Materiais Não Metálicos			
Borracha	kg	684,4	587,9
Polietileno	kg	789,0	789,0
Polipropileno	kg	35,8	11,6
Filme celulose	kg	73,2	73,2
Fibra vidro inorgânica	kg	10,1	10,1
4 Lubrificantes/Fluídos			
Óleo hidráulico	L	3.255,0	3.255,0
Óleo lubrificante	L	2.564,3	2.564,3
Óleo motor	L	2.318,4	2.318,4
Óleo diesel	L	3.536,3	3.536,3
Graxa	kg	1.914,6	1.554,7

Cada colhedora emprega um conjunto de 10 facas (cinco facas para cada corte de base). Essas facas têm a frequência de substituição de 32 horas, o que representa um consumo de 5.663 kg de aço carbono ao longo do ciclo de vida útil da colhedora.

A título de conhecer o desgaste por abrasão nas facas, durante a operação de colheita, foi medida a massa residual final em um conjunto de facas no momento de sua substituição (32 horas de trabalho). Com o auxílio de uma balança digital de precisão com desvio padrão de 1,0 g, foi encontrada a massa residual final igual a 7,552 kg; subtraindo o valor dessa massa residual final da massa residual inicial, de 8,351 kg (conjunto facas novas), resulta que 0,799 kg de aço carbono foi consumido pelo desgaste por abrasão, durante 32 horas de operação da colhedora no processo de colheita da cana-de-açúcar.

Extrapolando o valor 0,8 kg e projetando-o durante o ciclo de vida útil da colhedora, encontramos que 542 kg de aço carbono serão consumidos por abrasão, durante a operação da colhedora, no processo de colheita. Esse aço carbono consumido pelo desgaste por abrasão possivelmente está sendo depositado no solo ou até mesmo levado para a usina juntamente com a cana-de-açúcar colhida.

A Tabela 8 apresenta o fluxo de material dos rodantes utilizados na manutenção e reparo durante o ciclo de vida útil das máquinas 1 e 2; sendo a máquina 1 com rodas e pneus e a máquina 2 com esteiras metálicas. Os insumos que representaram a maior quantidade de consumo durante o ciclo de vida útil das máquinas foram: a borracha (máquina 1) e o ferro fundido nodular (máquina 2) com 1.851,7 kg e 6.342,1 kg respectivamente.

O tempo de mão-de-obra, é maior para a máquina 2 em relação a máquina 1. Isso se dá em função do rodante de esteiras metálicas da máquina 2, ser mais complexo para efetuar a sua substituição do que o rodante de rodas e pneus da máquina 1.

Tabela 8 – Fluxos de materiais dos rodantes na manutenção e reparo na vida útil das máquinas

Entrada	Unidade	Fluxo de material	
		Máquina 1	Máquina 2
Mão-de-obra	h	18,1	211,6
Borracha	kg	1.851,7	-
Ferro fundido nodular	kg	-	6.342,1
Aço forjado	kg	-	3.959,1
Aço carbono	kg	-	541,1

REFERÊNCIAS

- AHOKAS, J.; MIKKOLA, H.J. **A method to include machine manufacturing energy in energy balance analysis**. Nordic Association of Agricultural Scientists, Vilnius, v. 3, n. 4, p. 78-82, 2007.
- BANCHI, A.D.; LOPES, J.R.; ZAGO, C.A. Estudo sobre renovação de frota em colhedoras de cana-de-açúcar. **Revista Agrimotor**, edição 33, p. 8-9. Disponível em: <<http://www.assiste.com.br>>. Acessado em: 06 abril 2011.
- BERRY, R.S.; FELS, M.F. **The production and consumption of automobiles: An energy analysis of the manufacture, discard and reuse of the automobile and its component materials**. Illinois Institute for Environmental Quality, Department of Chemistry, University of Chicago, 74 p., jul. 1972.
- BOUSTEAD, I.; HANCOCK, G.F. **Handbook of industrial energy analysis**, Chichester: Ellis Horwood Publishers England, 422 p., 1979.
- BRIDGES, T.C., SMITH E.M. A method for determining the total energy input for agricultural practices. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, p. 781-784, 1979.
- DELEAGE, J.P.; JULIEN, J.M.; SAUGET-NAUDIN, N.; SOUCHON, C. Eco-energetics analysis of an agricultural system: The French case in 1970. **Agro-ecosystems**, Amsterdam: Elsevier, v. 5, p. 345-365, 1979.
- DESIMONE, L.; POPOFF, F. 1997. **Eco-Efficiency: The Business Link to Sustainable Development**. Cambridge: MIT Press, 292 p., 1997.
- DOERING, O.C. Accounting for energy in farm machinery and buildings. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Handbook of energy utilization in agriculture**. Florida: Boca Raton, CRC, chap. 1, p. 9-14, 1980.
- DYER, J.A.; DESJARDINS, R.L. Carbon dioxide emissions associated with the manufacturing of tractors and farm machinery in Canada. **Biosystems Engineering**, London: Academic Press, v. 93, n. 1, p. 107-118, 2006.
- FIKSEL, J. **Ingeniería de diseño medioambiental DFE**. Desarrollo integral de productos y procesos ecoeficientes. Madrid: McGraw-Hill España, 512 p., 1997.
- MACEDÔNIO, A.C.; PICCHIONI, S.A. Metodologia para cálculo do consumo de energia fóssil no processo de produção agropecuária. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura, Depto. de Economia Rural, 95 p., 1985.
- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. O desenvolvimento de produtos sustentáveis. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 368 p., 2002.

MIKKOLA, H.J.; AHOKAS, J. Indirect energy input of agricultural machinery in bioenergy production. **Renewable Energy**, Helsinki, v. 35, p. 23-28, 2010.

Ministério da Fazenda. Instrução Normativa SRF nº 162 (31 de dezembro de 1998). Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/Legislacao/ins/Ant2001/1998/in16298.htm>>. Acessado em: 28 julho 2010.

OLICANA. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.olicana.com.br>> . Acessado em: 28 julho 2010.

ROMANELLI, T.L. Sustentabilidade energética da cana-de-açúcar In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Autores, 2ª ed., v. 1, p. 304-312, 2009.

ROMANELLI, T.L.; MANTOAM, E.J. Methodology for energy and material embodiment determination in the life cycle of agricultural machinery. In: **International Conference of Agricultural Engineering CIGR - AgEng2012**, Valência, Espanha, p. 1-6, jul. 2012.

ROMANELLI, T.L.; MILAN, M. 2010. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 375-383, jul./ago. 2010.

SENAI. **Apostila: materiais metálicos e não metálicos**. Departamento Regional - Espírito Santo, 46 p., 1996.

UNICA. **União da Indústria de Cana-de-açúcar**. Protocolo agroambiental do setor sucroalcooleiro. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acessado em: 28 julho 2010.

ANEXOS

ANEXO A - Índices de energia incorporada dos insumos

Insumo	Unidade	Energia incorporada MJ unidade ⁻¹	Fonte
ABS reciclado	kg	1,24	U.S. EPA (1974) apud *
Ácido sulfúrico	kg	2,48	Bravard et al. (1972) apud *
Aço carbono	kg	51,52	Berry e Fels (1973) apud *
Aço forjado	kg	78,85	Berry e Fels (1973) apud *
Aço inox	kg	81,77	Berry e Fels (1973) apud *
Água	m ³	2,37	Leach e Slessor (1974) apud *
Alumínio	kg	231,00	Stodolsky et al. (1995)
Anticorrosivo ¹	kg	2,29	Leach e Slessor (1974) apud *
Borracha	kg	88,00	Stodolsky et al. (1995)
Bronze ²	kg	140,00	Stodolsky et al. (1995)
Chumbo	kg	17,31	Porameswaren e Nadkarni (1975) apud *
Cobre	kg	140,00	Stodolsky et al. (1995)
Eletricidade	kWh	15,00	*
Espuma poliuretano ³	kg	110,16	*
Ferro fundido nodular	kg	32,66	Samples (1974) apud *
Fibra sintética algodão ⁴	kg	45,29	*
Fibra têxtil reciclado ⁴	kg	45,29	*
Fibra vidro+Al ⁵	kg	0,79	Bravard et al. (1972) apud *
Fibra vidro ⁵	kg	0,79	Bravard et al. (1972) apud *
Filme celulose	kg	192,53	Imperial Chemical Ind. (1974) apud *
Fio de aço	kg	19,10	Decker (1976) apud *
Gás tetrafluoroetano ⁶	kg	58,89	*
GLP	kg	58,89	*
Graxa	kg	43,38	MME (2000)
Latão ²	kg	140,00	Stodolsky et al. (1995)
Mão-de-obra	h	2,20	Serra et al. (1979)
Nitrogênio gasoso	kg	1,67	U.S. Dept. of Commerce (1975) apud *
Nylon 6.6	kg	31,80	*
Óleo diesel	L	47,78	Cervinka, 1980. In: Pimentel (1980)
Óleo hidráulico ⁷	L	37,28	MME (2009)
Óleo lubrificante	L	37,28	MME (2009)
Óleo motor ⁷	L	37,28	MME (2009)
Papel	kg	34,38	Newton (1973) apud *
Polietileno	kg	52,45	Ayres et al. (1974) apud *
Polipropileno	kg	110,16	*
Poliuretano ³	kg	110,16	*
Pó químico ABC ⁸	kg	2,48	Bravard et al. (1972) apud *
Prédio (construção)	m ²	3500	Tavares (2006)
PVC	kg	10,64	Ayres et al. (1974) apud *
Sílica	kg	0,79	Bravard et al. (1972) apud *
Solvente ⁸	kg	2,48	Bravard et al. (1972) apud *
Tinta ⁸	kg	2,48	Bravard et al. (1972) apud *
Vidro laminado	kg	30,22	Samples (1974) apud *
Zinco	kg	56,63	Porameswaren e Nadkarni (1975) apud *

* Boustead and Hancock (1979)¹ Adotado índice sulfato de amônia; ² Adotado índice cobre; ³ Adotado índice polipropileno; ⁴ Adotado índice tecer algodão; ⁵ Adotado índice sílica; ⁶ Adotado índice GLP; ⁷ Adotado índice óleo lubrificante; ⁸ Adotado índice ácido sulfúrico.