

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE MANDIOCA, CANA-DE-AÇÚCAR E MILHO<sup>1</sup>**

**DIONES ASSIS SALLA<sup>2</sup> & CLÁUDIO CABELLO<sup>3</sup>**

---

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi a análise energética de sistemas de produção de etanol utilizando como fonte de carboidratos a mandioca, a cana-de-açúcar e o milho. As pesquisas de campo foram realizadas na região do Vale do Médio Paranapanema, estado de São Paulo, nas operações agrônômicas de cultivo e de processamento industrial das matérias-primas em análise. O dispêndio de energia referente à parte agrícola foi apresentado pelo consumo energético da etapa de produção de um hectare de cana-de-açúcar, de mandioca e de milho, nas operações de preparo da área, plantio, insumos, condução da lavoura, colheita, transporte à indústria e drenagem energética. O dispêndio de energia referente à parte industrial foi apresentado pelo consumo energético da etapa de processamento de uma tonelada de cana-de-açúcar, de mandioca e de milho, nas operações de desintegração/moagem, hidrolise/sacarificação/tratamento do caldo, fermentação, destilação e manutenção dos equipamentos. No sistema de produção agrônômica das matérias-primas, a mandioca apresentou um dispêndio energético inferior ao da cana-de-açúcar e ao do milho. (9.528,33 MJ ha<sup>-1</sup>; 14.370,90 MJ ha<sup>-1</sup> e 15.633,83 MJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Em relação ao etanol produzido, as operações de cultivo consumiram 1,54 MJ l<sup>-1</sup> com a mandioca; 1,99 MJ l<sup>-1</sup> com a cana-de-açúcar; e 7,9 MJ l<sup>-1</sup> com o milho. No processamento industrial de uma tonelada de matéria-prima, a cana-de-açúcar apresentou um custo energético menor do que a mandioca e o milho (1.641,56 MJ t<sup>-1</sup>; 2.208,28 MJ t<sup>-1</sup> e 3.882,39 MJ t<sup>-1</sup>, respectivamente), entretanto, apresentou um custo maior do que estas quando relacionada ao etanol produzido (19,38 MJ l<sup>-1</sup>; 11,76 MJ l<sup>-1</sup> e 11,76 MJ l<sup>-1</sup>, respectivamente). No balanço energético final, para cada megajoule de energia investido na cana-de-açúcar foram requeridos 1,09 MJ (9%); para cada megajoule de energia investido na mandioca foram requeridos 1,76 MJ (76%) e para cada megajoule de energia investido no milho foram requeridos 1,19 MJ (19%). De maneira geral, concluiu-se que a mandioca consome menos energia do que a cana-de-açúcar e o milho no processo agroindustrial de obtenção do etanol.

**Palavras-chave:** Biomassa, etanol, sustentabilidade.

---

<sup>1</sup> Extraído da tese do primeiro autor intitulada: Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, da cana-de-açúcar e milho.

<sup>2</sup> Aluno do curso de Pós-graduação em Agronomia - Energia na Agricultura – FCA/UNESP, Botucatu/SP - Brasil. diones.salla@gmail.com

<sup>3</sup> Orientador, docente e pesquisador do Centro de Raízes e Amidos Tropicais - CERAT/UNESP, Caixa Postal 237, 18610-307, Botucatu/SP – Brasil. dircerat@fca.unesp.br

## THE ENERGETIC ANALYSIS OF ETHANOL SYSTEMS PRODUCTION FROM THE MANIOC, THE SUGAR CANE AND THE CORN CROPS

**SUMMARY:** *The objective of this work was the analysis of the energetic ethanol production systems using as source of carbohydrates, manioc, sugar cane and maize crops. The searches were carried from the field in the Paranapanema River Valley, state of Sao Paulo in the operations of cultivation and industrial processing of raw materials for analysis. The expenditure of energy concerning the agricultural part was made by the energy consumption of stage production of one hectare of sugar cane, cassava and corn, tillage and planting procedure, inputs, driving the crop, harvest, transport industry and energy draining. The expenditure of energy referring to the part was made by the industry energy consumption of stage processing of one tonne of sugar cane, cassava and corn, in the operations of disintegration / milling, hydrolysis / treatment of the broth, fermentation, distillation and maintenance of equipment. Under the system of agronomic production of raw materials, manioc presented an energy expenditure below that of sugar cane and maize ( $9,528.33 \text{ MJ ha}^{-1}$ ;  $14,370.90 \text{ MJ ha}^{-1}$  and  $15,633.83 \text{ MJ ha}^{-1}$ , respectively). For the ethanol produced, the operations of cultivation has consumed  $1.54 \text{ MJ l}^{-1}$  with manioc;  $1.99 \text{ MJ l}^{-1}$  with sugar cane, and  $7.9 \text{ MJ l}^{-1}$  with the corn. In the industrial processing of a ton of raw material, sugar cane presented an energy cost less than the cassava and maize ( $1,641.56 \text{ MJ t}^{-1}$ ;  $2,208.28 \text{ MJ t}^{-1}$  and  $3,882.39 \text{ MJ t}^{-1}$ , Respectively), however, showed a higher cost than when they related to ethanol produced ( $19.38 \text{ MJ l}^{-1}$ ;  $11.76 \text{ MJ l}^{-1}$  and  $11.76 \text{ MJ l}^{-1}$ , respectively). In the final energy balance for each megajoules of energy invested in sugar cane were required  $1.09 \text{ MJ}$  (9%), for each megajoules of energy invested in manioc were required  $1.76 \text{ MJ}$  (76%) and for each megajoules energy invested in maize were required  $1.19 \text{ MJ}$  (19%). Overall, it appears that the manioc consumes less energy than sugar cane and corn crops in the process of agribusiness obtaining ethanol.*

**Keywords:** *Biomass, ethanol, sustainability.*

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a utilização da mandioca como matéria-prima para produção de etanol sempre foi discutida tomando-se como referencial a cultura da cana-de-açúcar que lhe concorre com vantagens econômicas. No entanto, quando a análise é procedida a partir da contabilidade energética das operações de cultivo, do processamento industrial e das repercussões no agroecossistema, a mandioca pode revelar van-

tagens em relação ao milho e à cana-de-açúcar. Uma análise apenas econômica tem ofuscado os potenciais da mandioca para geração de energia limpa, inibindo as iniciativas nessa direção. Por outro lado, a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar modernizou um setor de tecnologias rudimentares, mudou a relação dos fornecedores com os industriais, diminuiu a taxa de ociosidade das unidades processadoras, incrementou a indústria de açúcar, motivou as montadoras a desenvolverem modelos de veículos *flex fuel* e com menores custos de produção e escalabilidade, possibilitando à cadeia um ganho de produtividade sem precedentes.

A questão principal e norteadora que se coloca para o presente trabalho é a análise das energias consumidas durante o processo de produção e de processamento industrial da mandioca, da cana-de-açúcar e do milho, bem como as energias obtidas na forma de etanol. Os resultados mostraram que a cultura da mandioca consome menos energia no processo de obtenção de etanol do que as demais fontes de carboidratos analisadas, ou seja, a energia consumida nas operações de cultivo da mandioca é menor do que a energia consumida nas operações de cultivo da cana-de-açúcar e nas do milho; a energia consumida no processamento industrial, por litro de etanol produzido, é menor na mandioca do que na cana-de-açúcar e no milho; os balanços energéticos finais apresentados pela mandioca são superiores aos apresentados pela cana-de-açúcar e pelo milho.

Mesmo que para a ciência seja indiferente fazer proposições, a pesquisa foi concebida para que os resultados alcançados concorram para o progresso e para o crescimento do setor bioenergético. Além do mais, a ampliação da participação da biomassa, a partir do desenvolvimento de fontes amiláceas, propicia a oportunidade de executar políticas de cunho social, ambiental e econômico em todo o território nacional. Será também uma iniciativa para promover importante aumento de novos investimentos, emprego, renda e desenvolvimento tecnológico, além de uma oportunidade para atender parte da crescente demanda mundial por combustível de reduzido impacto ambiental.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Planejamento experimental**

#### **2.1.1 Delimitação do sistema para obtenção dos dados de campo**

Para a verificação das energias envolvidas nos processos de produção de etanol das matérias-primas analisadas (mandioca, cana-de-açúcar e milho) foi escolhida a região paulista do Vale do Médio

Paranapanema, onde os três sistemas de produção estão presentes caracterizando-se como um agroecossistema representativo no cultivo e na industrialização da mandioca, da cana-de-açúcar e do milho.

No cultivo, colheita e transporte das espécies pesquisadas, cada operação foi detalhada no sentido de determinar o número de horas gastos com a mão-de-obra envolvida, a quantidade dos insumos usados e, por fim, a conversão das diversas unidades físicas em unidades energéticas.

A unidade utilizada para o estudo da eficiência energética é a do Sistema Internacional, ou seja, o Joule e seus múltiplos, principalmente megajoules (MJ). Onde: 1 cal = 4,1868 J; 1 cal = 0,0000041868 MJ; 1.000 cal = 1 kcal = 4186,8 J; 1 kcal = 0,0041868 MJ; 1cv = 1HP x 1,014<sup>-1</sup>e 1HP = 2,648 10<sup>3</sup> J.

## 2.1.2 Prospecção dos dados

### 2.1.2.1 Produção agrônômica da mandioca

As matrizes dos coeficientes técnicos foram elaboradas com base em informações coletadas em maio e junho de 2007, junto aos técnicos da indústria Halotek Fadel, localizada no município de Palmital/SP; aos pesquisadores da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios do Médio Paranapanema (APTA), sediada no município de Assis/SP e aos produtores rurais da região do Médio Paranapanema. Analisou-se a produção da mandioca cultivada com 2 ciclos vegetativos, produtividade de 33 toneladas por hectare, plantio convencional, aplicação de calcário, adubação (plantio e cobertura), herbicidas (2 vezes), inseticidas (2 vezes), capina manual (1 vez), capina mecânica (3 vezes) e colheita semi-mecanizada.

Nas análises do consumo energético referentes à produção da mandioca adotou-se o termo “preparo de área” para representar a energia da mão-de-obra que é empregada nas operações de preparo do solo (gradagens pesada e leve), a marcação de carregadores, o levantamento de terraços e a aplicação de calcário. Representa também a energia gasta com o óleo diesel consumido nessas operações. Do mesmo modo, adotou-se o termo “plantio” para representar a energia da mão-de-obra e do óleo diesel despendidos nas atividades de corte, de preparo, de transporte e de plantio do material de propagação. O termo “insumos” representa os seguintes itens: calcário, manivas, inseticidas, herbicidas e fertilizantes. Já o termo “condução da lavoura” refere-se à energia da mão-de-obra e o consumo de óleo diesel despendidos nas atividades de capina manual (3x), poda, aplicação de herbicidas (2x), aplicação de inseticidas (2x), cultivador – capina mecânica (3x), adubação de cobertura (1x), dessecação, manutenção de máquinas e equipamentos. O termo “colheita” reúne as energias empregadas pela mão-de-obra e pelo consumo de óleo diesel nas operações de roçar/afofar, arrancar, despincar, carregar e transportar as raízes internamente na lavoura. O

termo “transporte até a indústria” refere-se à energia consumida pelo operador do caminhão no transporte da produção de um hectare de mandioca até a indústria, bem como a do óleo diesel consumido para fazê-lo.

### **2.1.2.2 Produção agrônômica da cana-de-açúcar**

As matrizes dos coeficientes técnicos das operações agrônômicas de cultivo, colheita e transporte da cana-de-açúcar foram levantadas na sede do Departamento Agrícola da Associação Rural dos Fornecedoros e Plantadores de Cana da Média Sorocabana (ASSOCANA) e na Agência Paulista de Tecnologia do Agronegócio do Médio Paranapanema (APTA), localizadas no município de Assis/SP. Os dados relativos ao cultivo da cana-de-açúcar foram obtidos do seguinte modo: os dados relativos à implantação da lavoura, por ser uma atividade única para os cinco anos subsequentes de produção, foram rateados em partes iguais para os cinco anos de cultivo. Desse modo, cada ciclo produtivo incorporou um quinto do dispêndio energético correspondente à fase de instalação da lavoura; o gasto energético com a colheita e manutenção das soqueiras foi calculado levando em consideração a produção média dos cinco anos.

As operações referentes à implantação da lavoura foram as seguintes: duas gradagens aradoras, duas gradagens niveladoras, marcação de carregadores, levantamento dos terraços, aplicação de calcário, sulcação/adubação, carregamento/transporte da muda para o plantio, cobrição, aplicação de herbicida e inseticida (cupim e formiga). Para as operações de colheita e manutenção das soqueiras consideraram-se as seguintes etapas: colheita mecanizada, transbordo, transporte da cana-de-açúcar para a usina, enleiramento da palha, cultivador (subsolador, adubação e cobertura), conservação de carregadores, conservação de estradas, aplicação de herbicida, aplicação aérea de maturador, transporte interno dos insumos, manutenção e transporte dos maquinários.

As atividades referentes ao dispêndio energético do trabalho humano nas operações de implantação e condução do cultivo da cana-de-açúcar foram as seguintes: corte e preparo da muda; descarregamento/esparramamento/repicagem para o plantio; acabamento e recobrimento do material de propagação; aplicação de herbicida e aplicação de inseticidas (formicida e cupinicida); operador da colheitadeira, do transbordo e do caminhão de transporte externo; capina manual, enleiramento da palha, cultivador (subsolador, adubação e cobertura); conservação dos carregadores; manutenção de estradas; controle de formigas; aplicação de herbicida; aplicação aérea de maturador; transporte interno dos insumos; manutenção e transporte de máquinas.

Nas análises do consumo energético referentes à produção da cana-de-açúcar adotou-se o termo “preparo de área” para representar a energia empregada com mão-de-obra nas operações de preparo do

solo, marcação de carregadores, levantamento de terraços, aplicação de calcário, gradagem pesada e gradagem leve. O termo representa também os gastos com óleo diesel nas operações mecanizadas com gradagens aradoras (2x), gradagens niveladoras (2x), marcador dos carregadores e levantamento dos terraços. O termo “plantio” foi adotado para representar a energia com mão-de-obra empregada nas atividades de corte e preparo de mudas, descarregamento, esparramamento, repicagem, acabamento e recobrimento do material de propagação. O termo representa também os gastos energéticos com o óleo diesel nas operações de aplicação de calcário, sulcação/adubação, carregamento e transporte das mudas, e cobertura. O termo “insumos” representa os itens relativos à instalação da lavoura que compreende o calcário, mudas, inseticidas, herbicidas, formicidas, cupinídeos e fertilizantes. Representa também os itens relacionados à manutenção da soqueira, que são: herbicidas, adubação de soqueira e maturadores. O termo “condução da lavoura”, referente à mão-de-obra, aborda as seguintes operações: aplicação de herbicidas, inseticidas (cupinídeo e formicida), capina manual, enleiramento da palha, cultivador (subsolador, adubação de cobertura), conservação de carregadores, manutenção de estradas, transporte interno dos insumos, manutenção e transporte de máquinas (caminhão, prancha, graxa, abastecimento). Já o termo “condução da lavoura,” que trata do consumo de óleo diesel, refere-se às operações mecanizadas de implantação e manutenção das soqueiras, ou seja: aplicação de herbicidas, enleiramento da palha, cultivador (subsolador, adubação de cobertura), conservação de carregadores, manutenção de estradas, aplicação aérea do maturador, transporte interno de insumos e manutenção e transporte de máquinas (caminhão, prancha, graxa, abastecimento). O termo “colheita” reúne as energias empregadas pela mão-de-obra com as operações da colheitadeira e do transbordo, bem como, a do óleo diesel consumido nessas operações. O termo “transporte até a indústria” refere-se à energia consumida pelo operador do caminhão no transporte da produção de um hectare de cana-de-açúcar até a indústria, bem como, a do óleo diesel consumido para fazê-lo.

### 2.1.2.3 Produção agrônômica do milho

As matrizes dos coeficientes técnicos das operações agrônômicas de cultivo, colheita e transporte do milho de primeira safra foram levantadas na COOPERMOTA, em Cândido Mota, na Cooperativa Agrícola de Pedrinhas Paulista (CAP), em Pedrinhas Paulista, na Agência Paulista de Tecnologia do Agrogócio do Médio Paranapanema (APTA) e no Escritório de Desenvolvimento Rural (EDR/CATI), localizado no município de Assis, SP.

As operações de implantação e condução da lavoura foram as seguintes: dessecação, manutenção de carregadores, manutenção do terraço, aplicação de calcário, plantio/adubação, adubação de cobertura, duas aplicações de herbicida, duas aplicações de inseticida, colheita mecanizada, manutenção e transporte

de máquinas (caminhão, graxa, prancha, abastecimento etc), transporte interno de insumos e transporte externo (grãos até a indústria). O dispêndio energético referente à mão-de-obra foi calculado sobre as mesmas atividades citadas.

Para o cálculo do transporte até a indústria adotou-se uma distância média de 30 km e uma produtividade de 6 t ha<sup>-1</sup>.

Nas análises do consumo energético referentes à produção do milho adotou-se o termo “preparo de área” para representar a energia da mão-de-obra empregada nas operações de dessecação, manutenção de carreadores, manutenção de terraços e aplicação de calcário, bem como, a energia do óleo diesel consumido nessas operações. O termo “plantio” foi adotado para representar a energia da mão-de-obra e do óleo diesel dispendidos nas atividades de tratamento das sementes e na adubação de semeadura. O termo “insumos” representa os seguintes itens: calcário, sementes, inseticidas, formicidas, herbicidas e fertilizantes. O termo “condução da lavoura” refere-se à energia da mão-de-obra e do consumo de óleo diesel dispendidos nas atividades com o uso do cultivador, aplicação de formicida, aplicação de inseticida (2x), aplicação de herbicida (2x), manutenção e transporte de máquinas, transporte interno de insumos, adubação de cobertura, manutenção e transporte (caminhão, graxa, prancha, abastecimento). O termo “colheita” reúne as energias empregadas pela mão-de-obra e pelo consumo de óleo diesel nas operações de colheita mecanizada. O termo “transporte até a indústria” refere-se à energia consumida pelo operador do caminhão no transporte da produção de um hectare de milho até a indústria, bem como a do óleo diesel consumido para fazê-lo.

#### **2.1.2.4 Índices energéticos e parâmetros utilizados na produção agrônômica das matérias-primas.**

Os gastos energéticos com as operações mecanizadas foram calculados a partir do consumo de óleo diesel e de etanol, cujos coeficientes energéticos médios equivalem a 40,64 MJ l<sup>-1</sup> e 23,37 MJ l<sup>-1</sup>, respectivamente. (WANG et al., 1997; BERTHIAUME et al., 2001; SHAPOURI et al., 2002; PIMENTEL, 2003; PATZEK, 2004). Para a mão-de-obra dessas operações adotou-se o índice de 1,2 MJ h<sup>-1</sup>, sendo a jornada de trabalho de 8 horas (COMITRE, 1993).

Para o material de propagação da mandioca adotou-se o índice de 494,0 MJ ha<sup>-1</sup> determinado por Silva e Serra (1978). Para o material de propagação da cana-de-açúcar adotou-se o valor de 480,0 MJ ha<sup>-1</sup> determinado por Urquiaga et al. (2005), cujo índice corresponde a 30 MJ t<sup>-1</sup>. Para o material de propagação do milho adotou-se o índice de 33,2 MJ kg<sup>-1</sup> utilizado por Bueno (2002), Pimentel et al. (1973) e Beber (1989), correspondendo a 598,1 MJ ha<sup>-1</sup>.

Os conteúdos energéticos do calcário, herbicidas e inseticidas correspondem a 0,2 MJ kg<sup>-1</sup>, 302,0 MJ kg<sup>-1</sup>, 306,6 MJ kg<sup>-1</sup>, respectivamente (BUENO, 2002). Na conversão das unidades físicas de nitrogênio total, fósforo e potássio em equivalentes energéticos utilizaram-se os índices de 73,3 MJ kg<sup>-1</sup> para o N (CAMPOS, 2001); 13,9 MJ kg<sup>-1</sup> para o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (MERCIER, 1978) e 9,2 MJ kg<sup>-1</sup> para o K<sub>2</sub>O (SHAPOURI et al., 2002). Para a adubação de cobertura da mandioca (KCL, 00.00.60) determinou-se o valor de 7,2 MJ kg<sup>-1</sup> (SHAPOURI et al., 2002). Para a adubação de cobertura do milho (Uréia-NH<sub>4</sub>-45%N) determinou-se o valor de 73,35MJ kg<sup>-1</sup> de nitrogênio (CAMPOS, 2001). Do mesmo modo, para a adubação de cobertura da cana-de-açúcar (Uréia-NH<sub>4</sub>-45%N + K<sub>2</sub>O, 20.00.60) determinou-se o valor de 73,3 MJ kg<sup>-1</sup> de nitrogênio e de 9,2 MJ kg<sup>-1</sup> para o K<sub>2</sub>O(CAMPOS, 2001e SHAPOURI et al., 2002, respectivamente).

Para o cálculo do transporte até a indústria adotou-se uma distância média de 30 km e uma produtividade de 33 t ha<sup>-1</sup> para a mandioca; 85 t ha<sup>-1</sup> para a cana-de-açúcar; e 6 t ha<sup>-1</sup> para o milho, que são as produtividades médias regionais dos cultivos comerciais.

#### **2.1.2.5 Erosão energética (depreciação)**

Devido à natureza desta pesquisa, cujo foco é a determinação dos *inputs* energéticos das operações de produção e industrialização da mandioca, da cana-de-açúcar e do milho, objetivando a obtenção do etanol e, devido às múltiplas especificidades envolvidas na determinação da depreciação energética ou do fluxo energético que migra da composição das máquinas e dos equipamentos para os agroecossistemas cultivados (erosão energética), adotamos o valor disponível na literatura, determinado por Bueno (2002), para o agroecossistema milho, que é de 250,5 MJ ha<sup>-1</sup>. Devido à intensidade das operações serem diferentes para cada cultivo, os valores foram determinados em função do consumo de combustível para cada espécie. Exemplo: as operações de 1 ha de milho transferem (das máquinas e equipamentos) para o agroecossistema 250,5 MJ ha<sup>-1</sup> e consomem 76,9 litros de óleo diesel; as operações de 1 ha de mandioca consomem 132,4 litros de óleo diesel. Assim, proporcionalmente, a erosão energética adotada para as operações de cultivo de 1 ha de mandioca é de 431 MJ ha<sup>-1</sup>. A partir do mesmo procedimento, a erosão energética adotada para as operações de cultivo de 1 ha de cana-de-açúcar é de 528,6 MJ ha<sup>-1</sup>.

#### **2.1.2.6 Processamento industrial da mandioca**

Os dados relativos ao consumo energético das operações industriais dispendido durante o processamento das raízes de mandioca foram obtidos através das especificações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos (motores elétricos, bombas, cevadeiras etc.), produzidos para atender basicamente às indústrias de farinha. Os pontos de coleta de dados foram os seguintes: condução das raízes de mandioca da

plataforma de recepção ao lavador-descascador; operações de lavagem e descascamento das raízes; condução das raízes do lavador-descascador ao picador-desintegrador; operações de picagem e desintegração das raízes; processos de hidrólise e sacarificação; fermentação e destilação.

As operações foram determinadas seguindo-se o modelo operacional adotado pela Indústria CO-RACI, localizada no município de São Pedro do Turvo, SP, que tem por finalidade a produção do etanol a partir da mandioca, do milho e da quirera de arroz. Os dados relativos ao dispêndio energético da mão-de-obra nas diferentes etapas do processamento industrial da mandioca também foram levantados nessa indústria.

Nas análises do consumo energético industrial adotou-se o termo “desintegração/moagem” para as etapas de pesagem, rampa de descarga, rosca transportadora de raízes, pré-lavador e lavador de raízes, correia e esteira transportadora de raízes, tiragem da casquinha, picador de raízes, roscas transportadoras de raiz picada, roscas-sem-fim da caixa alimentadora, cevadeira, preparo do mosto e bombas de transferência. O termo “hidrólise/sacarificação” inclui as operações de misturadores, bombas de transferência e resfriamento, e agitadores. Na etapa da “fermentação”, além do processo em si, considerou-se o consumo de energia dos agitadores e da bomba de transferência do vinho para as dornas. Na etapa da “destilação” considerou-se a transferência e agitadores do vinho volante, transferência do vinho para a coluna de destilação, bomba de acionamento do flegma, bomba da vinhaça e bomba do álcool fino, agitador e carregamento do vinhoto, exaustor de caldeira, bombas d’água da caldeira, porta da caldeira e carrinho de lenha que alimenta a caldeira.

### **2.1.2.7 Processamento industrial da cana-de-açúcar**

Os dados relativos ao consumo energético das operações industriais dispendido durante o processamento da cana-de-açúcar, foram levantados na Usina Pau D’Alho e na Usina Nova América, no período de janeiro a julho de 2007, adotando-se a média dos valores encontrados nas duas usinas. Os dados foram obtidos por meio das sucessivas medições na operacionalização das atividades, através de entrevistas com os responsáveis de cada seção e pelas anotações de controle realizadas pelos diferentes setores.

A agroindústria canavieira Pau D’Alho S/A localiza-se no município de Ibirarema/SP, equidistante 35 km dos municípios de Assis e Ourinhos/SP. Os valores foram obtidos com referência à capacidade máxima de processamento das destilarias que é de trezentas toneladas de cana-de-açúcar por hora ( $300 \text{ t h}^{-1}$ ) para a indústria Pau D’Alho e de quinhentas toneladas ( $500 \text{ t h}^{-1}$ ) para a indústria Nova América, sendo esta localizada no bairro Água D’Aldeia s/n, município de Tarumã/SP.

Os pontos de coleta de dados durante o processamento da cana-de-açúcar foram os seguintes: balanças de pesagem (2); sondas verticais (2); hilos (2); esteiras metálicas (2); mesas alimentadoras (3); pi-

gador de cana; tambor alimentador; desfibrador da cana picada; espalhador de cana desfibrada; eletroimã; esteiras de arraste de uma moenda para outra; moendas (4 ternos com 16 rolos na usina Pau D'Alho e 6 ternos com 24 rolos na usina Nova América); peneira rotativa (filtro do caldo); tratamento do caldo (aquecimento/resfriamento/decantação); processo de fermentação; destilação do vinho e sistemas de bombeamento necessários à lavagem da cana-de-açúcar, condução do caldo até as dornas e condução do vinho para a coluna de destilação.

Nas análises do consumo energético industrial adotou-se o termo “desintegração/moagem” para as etapas de pesagem, sondas verticais, hilos, esteiras metálicas, mesas alimentadoras, sistemas de bombeamento de água para lavagem, picador, tambor alimentador, desfibrador, espalhador da cana-de-açúcar desfibrada, esteira de transporte da cana-de-açúcar desfibrada, eletroimã, esteira de arraste de uma moenda para outra, moendas, sistema de bombeamento de água para o último conjunto de moendas. O termo “hidrólise/sacarificação” foi designado para as operações de tratamento do caldo (esterilização por aquecimento, resfriamento e decantação), sistema de bombeamento do caldo até as dornas. Na etapa da “fermentação”, além do processo em si, considerou-se o consumo de energia dos agitadores e da bomba de transferência do vinho para as dornas. Na etapa da “destilação” considerou-se a transferência e agitadores do vinho volante, transferência do vinho para a coluna de destilação, bomba de acionamento do flegma, bomba da vinhaça e bomba do álcool fino, agitador e carregamento do vinhoto, exaustor de caldeira, bombas d'água da caldeira e esteira para o transporte de bagaço.

### **2.1.2.8 Etapa de processamento industrial do milho**

A matriz dos coeficientes técnicos do processamento industrial do milho foi elaborada com base em medições e informações coletadas durante os meses de agosto e setembro, 2007. Os dados relativos ao consumo energético das operações industriais, dispendidos durante o processamento dos grãos de milho, foram obtidos através das especificações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos (motores elétricos, bombas, moinhos etc.).

Foram os seguintes os pontos de coleta de dados: pesagem, condução dos grãos de milho para a moagem, moagem, roscas espirais de condução do milho e do fubá, diluição do fubá, hidrólise e sacarificação, fermentação e destilação. As operações foram determinadas seguindo-se o modelo operacional adotado pela indústria CORACI, localizada no município de São Pedro do Turvo, SP. Os dados relativos ao dispêndio energético da mão-de-obra empregada nas diferentes etapas do processamento industrial, também foram levantados nessa indústria.

Nas análises do consumo energético industrial adotou-se o termo “desintegração/moagem” para as etapas de pesagem, transporte por rosca espiral dos grãos e moagem. O termo “hidrólise/sacarificação”

inclui as operações de esteira de fubá, diluição e bomba de fubá diluído, misturadores, bombas de transferência e resfriamento e agitadores. Na etapa da “fermentação”, além do processo em si, considerou-se o consumo de energia dos agitadores e da bomba de transferência do vinho para as dornas. Na etapa da “destilação” considerou-se a transferência e agitadores do vinho volante, transferência do vinho para a coluna de destilação, bombas de acionamento do flegma, bombas da vinhaça e bombas do álcool fino, agitador e carregamento da vinhaça, exaustor, bombas d’água, porta e carrinho de lenha da caldeira.

### **2.1.2.9 Índices energéticos e parâmetros utilizados no processamento industrial das matérias-primas.**

O dispêndio energético nas etapas industriais foi relativo ao consumo dos motores elétricos e do vapor fornecido pelas caldeiras. Os valores encontrados foram convertidos em megajoule e são proporcionais ao processamento de uma tonelada de mandioca e a obtenção de 187,8 litros de etanol; uma tonelada de cana-de-açúcar e a obtenção de 84,7 litros de etanol; e uma tonelada de grãos de milho e a obtenção de 330 litros de etanol. Procedeu-se a conversão do consumo dos motores elétricos de cavalo-vapor para HP, sendo que um cavalo-vapor (cv) equivale a 1,014 HP e 1 HP é igual a 2,684 MJ. Na destilação adotaram-se dois quilos de vapor para cada litro de etanol destilado. Para hidrolisar 1000 kg de raízes de mandioca foram necessários 1.236,07 MJ. Para hidrolisar 1.000 kg de grãos de milho foram necessários 1.851 MJ. No tratamento do caldo adotou-se 500 kg de vapor para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, onde 500 kg de vapor equivalem a 1.172,3 MJ.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

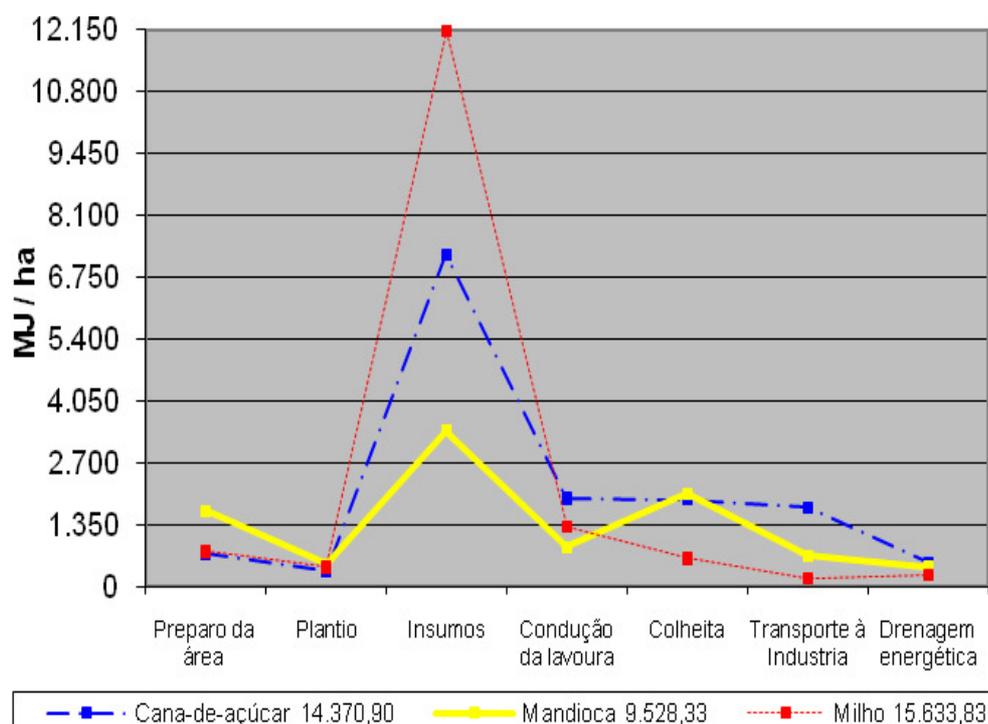
### **3.1 Energias investidas na produção agrícola da matéria-prima**

#### **3.1.1 Custo energético da produção agrícola da matéria-prima**

Os resultados apresentados na Tabela 1 e na Figura 1 referem-se ao custo energético das operações de produção de um hectare das matérias-primas cana-de-açúcar, mandioca e milho.

**Tabela 1** - Demonstrativo do custo energético ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ) para a produção de um hectare da matéria-prima.

OPERAÇÕES	Cana-de-açúcar	Mandioca	Milho
Preparo da área	722,38	1.648,13	762,97
Plantio	329,10	487,10	423,62
Insumos	7.239,00	3.403,46	12.109,29
Condução da lavoura	1.922,35	862,74	1.293,08
Colheita	1.900,77	2.025,34	609,60
Transporte até a indústria	1.729,60	670,56	185,28
Drenagem energética	527,70	431,00	250,00
<b>Total do consumo (<math>\text{MJ ha}^{-1}</math>)</b>	<b>14.370,90</b>	<b>9.528,33</b>	<b>15.633,83</b>

**Figura 1** - Demonstrativo gráfico do custo energético ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ) para produção de um hectare da matéria-prima

Nas operações de preparo de área a mandioca apresentou um consumo energético de 1.648,13 MJ ha<sup>-1</sup>, revelando-se superior às demais matérias-primas analisadas (Tabela 1). Em relação à cana-de-açúcar, o dispêndio energético apresentou-se mais elevado porque as atividades de preparo de área dessa cultura representam apenas um quinto do valor real (722,38 MJ ha<sup>-1</sup>), devido às características da atividade que demanda apenas um preparo de área para cinco colheitas consecutivas. Ou seja, o dispêndio energético (Tabela 1) de 722,38 MJ ha<sup>-1</sup> para o preparo de área da cana-de-açúcar é resultado do rateio, em partes iguais, para os cinco anos subseqüentes da atividade. O cultivo da mandioca também consumiu mais energia no preparo de área do que o cultivo do milho: 1.648,13 MJ ha<sup>-1</sup> e 722,38 MJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A razão dessa discrepância está no preparo da área do milho que, na região do Médio Paranapanema, é realizado no sistema de “plantio direto” que dispensa várias operações.

Nas atividades referentes à condução da lavoura, a mandioca apresentou um dispêndio energético inferior ao da cana-de-açúcar e ao do milho: 862,74 MJ ha<sup>-1</sup>, 1.922,35 MJ ha<sup>-1</sup> e 1.293,08 MJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Entretanto, nas operações de colheita, a mandioca apresentou um dispêndio energético superior ao cultivo do milho e semelhante ao da cana-de-açúcar. As operações mecânicas de roçagem/afofamento e o emprego intensivo de mão-de-obra nas atividades de arrancar, coletar, amontoar e de encher os *bag* consomem juntas 2.025 MJ ha<sup>-1</sup>. A cana-de-açúcar e o milho consumiram nas operações de colheita 1.900,77 MJ ha<sup>-1</sup> e 609,60 MJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Nas operações de transporte da matéria-prima para as indústrias de processamento, os valores se mostraram proporcionais à massa transportada. Assim, a cana-de-açúcar apresentou o maior custo energético (1.729,6 MJ ha<sup>-1</sup>), pois foi necessário transportar 85 toneladas de massa. O transporte de 33 toneladas de mandioca, referente ao cultivo de 1 hectare da matéria-prima, teve um dispêndio energético de 670,56 MJ ha<sup>-1</sup>. O transporte até a indústria de 6 toneladas de grãos de milho, referentes ao cultivo de 1 hectare da matéria-prima, consumiram 185,28 MJ ha<sup>-1</sup>.

A diferença mais representativa entre os cultivos examinados revelou-se no consumo de energia dos insumos utilizados para produção da matéria-prima. O cultivo de 1 hectare de mandioca apresentou um dispêndio energético de 3.403,46 MJ ha<sup>-1</sup>. Para cultivar 1 hectare de cana-de-açúcar e de milho foram consumidos 7.239,00 MJ ha<sup>-1</sup> e 12.109,29 MJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

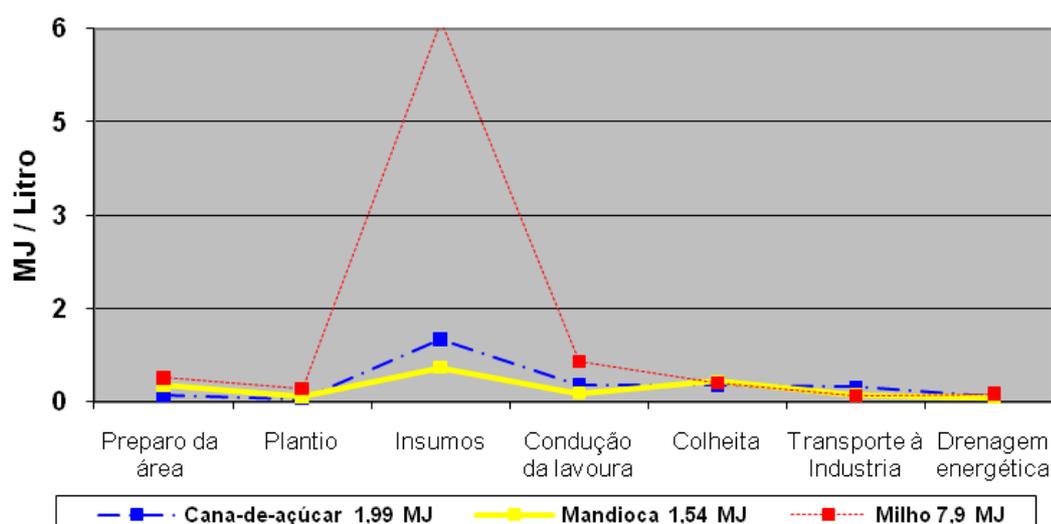
Do ponto de vista do consumo energético requerido em todo o processo de produção das matérias-primas, a mandioca apresentou o menor dispêndio (9.528,33 MJ ha<sup>-1</sup>). Os cultivos da cana-de-açúcar e do milho consumiram de modo semelhante e bem mais do que a mandioca: 14.370,90 MJ ha<sup>-1</sup> e 15.633,83 MJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

### 3.1.2 Custo energético na produção agrícola de um litro de etanol

Os resultados apresentados na Tabela 2 e na Figura 2 se referem ao custo energético total do litro de etanol, apresentado em cada uma das operações agrônômicas de cultivo (preparo da área, plantio, insumos, condução da lavoura, colheita, transporte à indústria e drenagem energética) das matérias-primas cana-de-açúcar, mandioca e milho.

**Tabela 2** - Demonstrativo do custo energético ( $\text{MJ l}^{-1}$ ) para produzir 1 litro de etanol nas principais operações agrônômicas de produção da matéria-prima

OPERAÇÕES	Cana-de-açúcar	Mandioca	Milho
Preparo de área	0,10	0,27	0,39
Plantio	0,05	0,08	0,21
Insumos	1,00	0,55	6,12
Condução da lavoura	0,27	0,14	0,65
Colheita	0,26	0,33	0,31
Transporte a Indústria	0,24	0,11	0,09
Drenagem energética	0,07	0,07	0,13
<b>Custo energético</b>	<b>1,99 <math>\text{MJ l}^{-1}</math></b>	<b>1,54 <math>\text{MJ l}^{-1}</math></b>	<b>7,90 <math>\text{MJ l}^{-1}</math></b>



**Figura 2** - Demonstrativo gráfico do custo energético ( $\text{MJ l}^{-1}$ ) para produzir um litro de etanol, nas principais operações de agrônômicas de produção da matéria-prima.

A análise do custo energético de cada operação de produção da matéria-prima, por litro de etanol produzido, revela o custo do etanol nos diferentes locais da atividade. A mandioca, que já havia apresentado um custo energético menor do que a cana-de-açúcar e do milho para produzir a matéria-prima ( $9.528,33 \text{ MJ ha}^{-1}$ ), apresentou também um custo energético menor em relação ao etanol produzido ( $1,54 \text{ MJ l}^{-1}$ ). A cana-de-açúcar, que já havia apresentado um custo energético para produção da matéria-prima superior ao da mandioca ( $14.370,90 \text{ MJ ha}^{-1}$  e  $9.528,33 \text{ MJ ha}^{-1}$ , respectivamente) apresentou também um custo mais elevado em relação ao etanol produzido ( $1,99 \text{ MJ ha}^{-1}$  e  $1,54 \text{ MJ ha}^{-1}$ , respectivamente). O milho, que já havia apresentado um custo energético superior ao da cana-de-açúcar e ao da mandioca nas operações de produção da matéria-prima ( $15.633,83 \text{ MJ ha}^{-1}$ ;  $14.370,90 \text{ MJ ha}^{-1}$  e  $9.528,33 \text{ MJ ha}^{-1}$ , respectivamente), apresentou também um custo energético maior com relação ao etanol produzido ( $7,9 \text{ MJ l}^{-1}$ ;  $1,99 \text{ MJ l}^{-1}$  e  $1,54 \text{ MJ l}^{-1}$ , respectivamente). Esse custo energético de produção do milho, que foi de aproximadamente quatro vezes maior ao da cana-de-açúcar e cinco vezes ao da mandioca, deveu-se basicamente aos insumos utilizados, em especial aos fertilizantes nitrogenados.

De acordo com Urquiaga et al. (2005), somente as culturas de alta produção de biomassa e com baixa adubação nitrogenada têm apresentado balanços energéticos positivos, o que poderia ser melhorado mediante o uso de variedades de melhor rendimento e a substituição e/ou redução da adubação nitrogenada com o uso de leguminosas - adubos verdes em rotação ou consórcio.

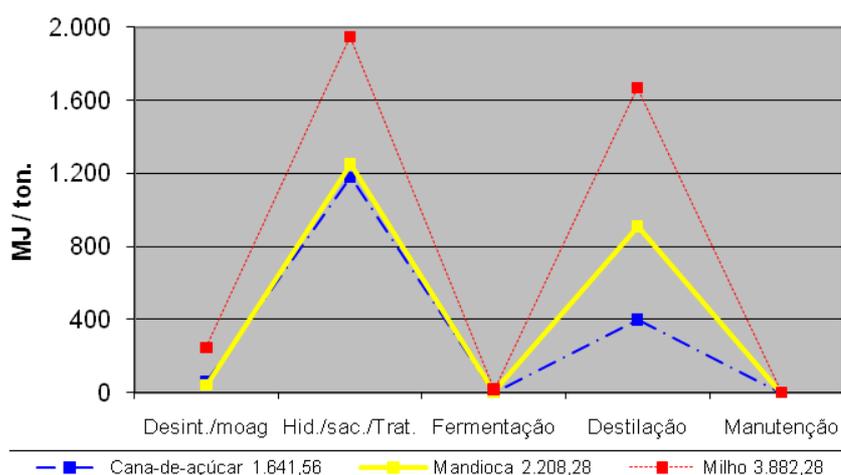
### **3.2 Energias investidas no processamento industrial da matéria-prima**

#### **3.2.1 Custo energético do processamento industrial da matéria-prima por tonelada e por hectare**

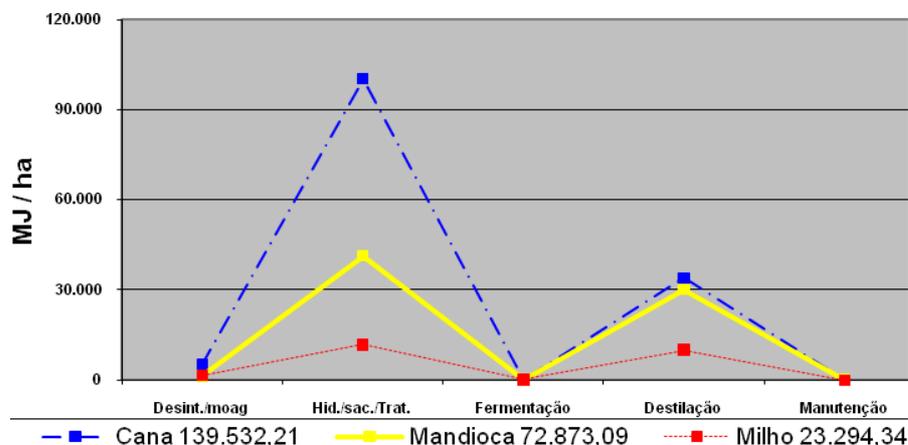
Os resultados aqui apresentados se referem ao custo energético das operações de processamento de uma tonelada e de um hectare das matérias-primas cana-de-açúcar, mandioca e milho (Tabela 3 e Figuras 3 e 4).

**Tabela 3** - Demonstrativo do custo energético para o processamento de uma tonelada ( $\text{MJ t}^{-1}$ ) e de um hectare ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ) de matéria-prima.

<b>Etapa industrial (<math>\text{MJ t}^{-1}</math>)</b>	Cana-de-açúcar	Mandioca	Milho
Desintegração/moagem	61,87	40,72	244,82
Hidrólise/sacarificação/Tratamento do caldo	1.179,54	1.252,63	1.950,35
Fermentação	0,38	2,99	17,97
Destilação	399,28	911,11	1.668,55
Manutenção	0,50	0,81	0,70
<b>Consumo industrial por tonelada</b>	<b>1.641,56</b>	<b>2.208,28</b>	<b>3.882,39</b>
<b>Etapa industrial (<math>\text{MJ ha}^{-1}</math>)</b>			
Desintegração/moagem	5.258,68	1.343,92	1.468,94
Hidrólise/sacarificação/Tratamento do caldo	100.260,48	41.336,75	11.702,12
Fermentação	31,93	98,81	107,79
Destilação	33.939,02	30.066,77	10.011,29
Manutenção	42,09	26,83	4,20
<b>Consumo industrial por hectare</b>	<b>139.532,21</b>	<b>72.873,09</b>	<b>23.294,34</b>



**Figura 3** - Demonstrativo gráfico do custo energético ( $\text{MJ t}^{-1}$ ) para o processamento industrial de uma tonelada de matéria-prima.



**Figura 4** - Demonstrativo gráfico do custo energético ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ) para o processamento industrial de um hectare de matéria-prima.

As operações de desintegração/moagem de uma tonelada de cana-de-açúcar, de mandioca e de milho apresentaram um consumo energético de  $1.641,56 \text{ MJ t}^{-1}$ ,  $2.208,28 \text{ MJ t}^{-1}$  e  $3.882,39 \text{ MJ t}^{-1}$ , respectivamente. As etapas de maior consumo energético foram a hidrólise/sacarificação/tratamento do caldo e a destilação, sendo também os que apresentaram os maiores diferenciais entre as matérias-primas examinadas. Na etapa da hidrólise/sacarificação/tratamento do caldo a cana-de-açúcar apresentou um consumo energético ligeiramente inferior ao da mandioca  $1.179,54 \text{ MJ t}^{-1}$  e  $1.252,63 \text{ MJ t}^{-1}$ , respectivamente. O milho apresentou um consumo energético superior ao da cana-de-açúcar e ao da mandioca ( $1.950,35 \text{ MJ t}^{-1}$ ;  $1.179,54 \text{ MJ t}^{-1}$  e  $1.252,63 \text{ MJ t}^{-1}$ , respectivamente). Na etapa de destilação de uma tonelada de matéria-prima, as diferenças entre a cana-de-açúcar, a mandioca e o milho se tornaram mais pronunciadas e mais uniformemente distribuídas:  $399,28 \text{ MJ t}^{-1}$ ;  $911,11 \text{ MJ t}^{-1}$  e  $1.668,55 \text{ MJ t}^{-1}$ , respectivamente. Para processar um hectare de cana-de-açúcar (Figura 4), com uma produtividade de  $85 \text{ t ha}^{-1}$ , foram consumidos  $139.532,21 \text{ MJ}$  de energia. A mandioca, com uma produtividade de  $33 \text{ t ha}^{-1}$ , consumiu  $72.873,09 \text{ MJ}$  e para processar  $6 \text{ t ha}^{-1}$  de milho foram consumidos  $23.294,34 \text{ MJ}$ .

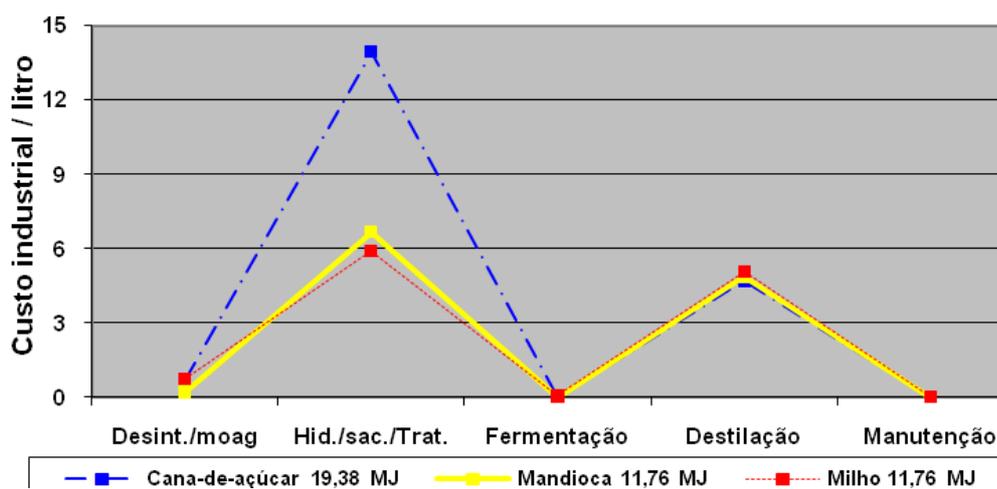
### 3.2.2 Custo energético do processamento industrial da matéria-prima por litro de etanol produzido

Os resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 5, se referem ao custo energético total do litro de etanol, apresentado em cada uma das operações de processamento industrial (desintegração/moagem,

hidrolise/sacarificação/tratamento do caldo, fermentação, destilação, manutenção de equipamentos e o custo energético) das matérias-primas cana-de-açúcar, mandioca e milho.

**Tabela 4** - Demonstrativo do custo energético ( $\text{MJ l}^{-1}$ ) para produzir 1 litro de etanol nas principais operações industriais de processamento da matéria-prima

OPERAÇÕES	Cana-de-açúcar	Mandioca	Milho
Desintegração /moagem	0,73	0,22	0,74
Hidrólise /sacarificação /Tratamento do caldo	13,93	6,67	5,91
Fermentação	0,00	0,02	0,05
Destilação	4,71	4,85	5,06
Manutenção	0,01	0,00	0,00
Custo energético total	<b>19,38 <math>\text{MJ l}^{-1}</math></b>	<b>11,76 <math>\text{MJ l}^{-1}</math></b>	<b>11,76 <math>\text{MJ l}^{-1}</math></b>



**Figura 5** - Demonstrativo gráfico do custo energético ( $\text{MJ l}^{-1}$ ) para produzir um litro de etanol nas principais operações de processamento industrial da matéria-prima.

A análise do dispêndio energético de cada operação de processamento da matéria-prima, por litro de etanol produzido, revela o custo do etanol nos diferentes locais da atividade. A cana-de-açúcar (Tabela 3) apresentou um custo energético menor do que a mandioca e o milho para processar uma tonelada de matéria-prima ( $1.641,56 \text{ MJ t}^{-1}$ ;  $2.208,28 \text{ MJ t}^{-1}$  e  $3.882,39 \text{ MJ t}^{-1}$ , respectivamente), entretanto, apresentou um custo maior do que estas (Tabela 4) quando relacionada ao etanol produzido ( $19,38 \text{ MJ l}^{-1}$ ;  $11,76 \text{ MJ l}^{-1}$  e  $11,76 \text{ MJ l}^{-1}$ , respectivamente). A mandioca e o milho, embora apresentem custos energéticos diferen-

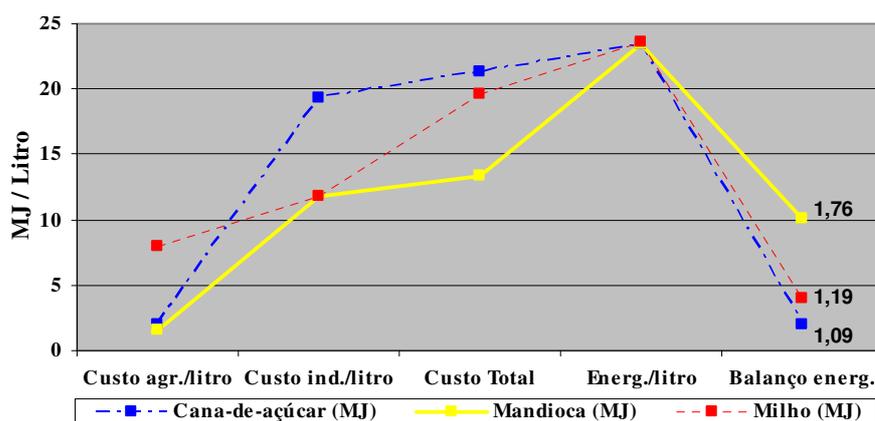
ciados nas diferentes etapas do processamento industrial, têm o mesmo dispêndio energético final (11,76 MJ l<sup>-1</sup>).

### 3.3 Balanço Energético

O balanço energético, demonstrado na Tabela 5 e na Figura 6, representa a síntese dos resultados da pesquisa. São apresentados de modo conjunto o custo agrônômico, o custo industrial e o custo agrônômico/industrial por litro de etanol produzido. A partir dessas informações definiu-se o balanço energético dos cultivos examinados.

**Tabela 5** - Demonstrativo dos custos agrônômico/industrial, somatória e o balanço energético do etanol no cultivo da cana-de-açúcar, mandioca e milho na região Paulista do Médio Paranapanema no período de 2007.

ITENS	Cana-de-açúcar (MJ)	Mandioca (MJ)	Milho (MJ)
Custo agrônômico por litro	1,99	1,54	7,89
Custo industrial por litro	19,38	11,76	11,76
Custo Total (industrial e agrônômico)	21,37	13,3	19,65
Energia em um litro de etanol	23, 375	23, 375	23, 575
<b>Balanço energético</b>	<b>1,09</b>	<b>1,76</b>	<b>1,19</b>



**Figura 6** - Demonstrativo gráfico do custo agrônômico/industrial e o balanço energético do etanol no cultivo da cana-de-açúcar, mandioca e milho na região paulista do Médio Paranapanema no período de 2007.

De acordo com os dados (Tabela 2 e Figura 2), o custo agrônômico do litro de etanol de milho mostrou-se superior ao da cana-de-açúcar e ao da mandioca ( $7,89 \text{ MJ l}^{-1}$ ;  $1,99 \text{ MJ l}^{-1}$  e  $1,54 \text{ MJ l}^{-1}$ , respectivamente). Entretanto (Tabela 4 e Figura 5), o custo de processamento industrial da cana-de-açúcar mostrou-se superior ao da mandioca e ao do milho ( $19,38 \text{ MJ l}^{-1}$ ;  $11,76 \text{ MJ l}^{-1}$  e  $11,76 \text{ MJ l}^{-1}$ , respectivamente). Vistos de modo conjunto, ou seja, somados os custos de produção agrônômica e de processamento industrial da matéria-prima, a cana-de-açúcar apresentou os maiores custos totais, seguida do milho e da mandioca ( $21,37 \text{ MJ l}^{-1}$ ;  $19,65 \text{ MJ l}^{-1}$  e  $13,3 \text{ MJ l}^{-1}$ , respectivamente). Os conteúdos energéticos de um litro de etanol de cana-de-açúcar, de milho e de mandioca são iguais ( $23,375 \text{ MJ l}^{-1}$ ). Desse modo, o balanço energético dos três cultivos ficou assim determinado: para cada megajoule de energia investido na cana-de-açúcar foram requeridos  $1,09 \text{ MJ}$  (9%); para cada megajoule de energia investido na mandioca foram requeridos  $1,76 \text{ MJ}$  (76%) e para cada megajoule de energia investido no milho foram requeridos  $1,19 \text{ MJ}$  (19%).

#### 4 CONCLUSÕES

A hipótese de pesquisa que embasou, referenciou e motivou a busca das informações para questioná-la, não pode ser refutada. A afirmação de que a mandioca consome menos energia do que a cana-de-açúcar e do milho, no processo de obtenção do etanol, se confirmou em todos os quesitos pesquisados, ou seja: no dispêndio energético para a produção agrônômica; no processamento industrial das matérias-primas por litro de etanol produzido; e nos balanços energéticos finais apresentados pela mandioca, pela cana-de-açúcar e pelo milho. O desempenho apresentado pelas espécies examinadas melhora a visibilidade de suas potencialidades e acena para a necessidade de prosseguimento das pesquisas nas áreas de produção agrônômica, de processamento industrial e de repercussões ambientais nos agroecossistemas de cultivo. De todo modo, ampliam-se as possibilidades para a produção sustentável de energia a partir de biomassas.

## 5 REFERÊNCIAS

- BEBER, J. A. C. **Eficiência energética e processos de produção em pequenas propriedades rurais.** **Agudo, RS.** 1989. 295f. Dissertação (Mestrado em Extensão Rural)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1989.
- BERTHIAUME, R.; BOUCHARD, C.; ROSEN, M. A. Exergetic evaluation of the renewability of a bio-fuel. **Exergy, An International Journal**, Canada, v. 1, n. 4, p. 68-256, 2001.
- BUENO, O. C. **Eficiência cultural do milho em assentamento rural, Itaberá/SP.** 2002. 147f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.
- CAMPOS A. T. **Balço energético relativo à produção de feno de “coast-cross” e alfafa em sistema intensivo de produção de leite.** 2001. 236 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)– Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.
- COMITRE, V. **Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto.** 1993. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Planejamento Agropecuário)–Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 9 abr. 2007.
- MERCIER, J. R. *Energie et agriculture, le choix ecologique.* Paris: Debard, 1978. 187 p.
- PATZEK, T. W. Thermodynamics of the corn-ethanol biofuel cycle. **Critical Reviews in Plant Sciences**, California, v. 23, n. 6, p. 519-567, 2004.
- PIMENTEL, D. Food production and the energy crises. **Science**, New York, v. 182, p. 9-443, 1973.
- PIMENTEL, D. Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. **Natural Resources Research**, California, v. 12, n. 2, p. 127-134, 2003.
- SHAPOURI, H.; DUFFIELD, J. A.; WANG, M. **The energy balance of corn ethanol: an update.** Washington, DC: US Department of Agriculture, Office of Energy Policy and New Uses, 2002. 19 p.

SILVA, J. G. da.; SERRA, G. E. Energy balance for ethyl alcohol production from crops. **Science**, Washington, DC, v. 201, n. 4358, p. 903-906, Sept. 1978.

URQUIAGA, A.; RODRIGUES ALVES, B. J.; BOODEY, R. M. Produção de biocombustíveis: a questão do balanço energético. **Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 14, n. 1, p. 42-46, 2005.

WANG, M. ; SARICKS, C. ; WU, M. **Fuel-cycle fossil energy use and greenhouse gas emissions of fuel ethanol produced from U.S. Midwest corn**. Argonne, IL: Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, 1997. Disponível em: <<http://www.ce.cmu.edu/~gdr/ readings/2006/03/21/Blottnitz>>. Acesso em: 14 mar. 2007.