

**Balanço das emissões de gases do
efeito estufa na produção
e no uso do etanol no Brasil**



**GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE**

Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil

Isaias de Carvalho Macedo – Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Universidade Estadual de Campinas – NIPE/UNICAMP

Manuel Regis Lima Verde Leal – Centro de Tecnologia Copersucar (CTC/Copersucar), Piracicaba

João Eduardo Azevedo Ramos da Silva – Centro de Tecnologia Copersucar (CTC/Copersucar), Piracicaba



**Governo do Estado de São Paulo
Geraldo Alckmin – Governador
Secretaria do Meio Ambiente
José Goldemberg – Secretário**

Janeiro 2004

Siglas		Abreviaturas	
CMA	Controle Mútuo Agrícola	AR	Açúcares redutores
CMI	Controle Mútuo Industrial	GEE	Gases de efeito estufa
CTC	Centro de Tecnologia Copersucar	GWP	<i>Global warming potential</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	PCI	Poder calorífico inferior
NIPE	Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – Unicamp	PCS	Poder calorífico superior
PAMPA	Programa de Acompanhamento Mensal de Performance Agrícola		
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas		

Unidades de medida		Fórmulas estruturais	
CV	Cavalo vapor	CH ₄	Metano
GJ	Gigajoule	CO ₂	Dióxido de carbono
ha	Hectare	H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
kcal	Quilocaloria	K ₂ O	Fertilizantes potássicos
kWh	Quilowatt hora	N	Nitrogênio
l	Litro	NH ₄	Radical amônia
MJ	Megajoule	N ₂ O	Óxido nitroso
POL	Polarização (teor de sacarose)	NO _x	Óxidos de nitrogênio
t	Tonelada métrica	P ₂ O ₅	Fertilizantes fosfatados
TC	Tonelada métrica de cana-de-açúcar		
TCH	Tonelada de cana-de-açúcar por hora		

Índice de quadros e tabelas

Figura 1	– Balanço de energia do sistema considerado – Cenário 1 (Mcal/TC)	17
Figura 2	– Emissões de GEE do sistema considerado – Cenário 1 (kg CO ₂ eq./TC)	19
Tabela 1	– Consumo de energia na produção de cana-de-açúcar	15
Tabela 2	– Consumo de energia na produção de etanol	16
Tabela 3	– Consumo e geração de energia na produção de cana-de-açúcar e etanol	16
Tabela 4	– Emissões no ciclo de vida do etanol	19
Tabela 5	– Produtividade da cana-de-açúcar (médias das safras 1998–1999 a 2002–2003 – Copersucar)	20
Tabela 6	– Operações agrícolas: equipamentos	21
Tabela 7	– Consumo de óleo diesel nas operações agrícolas	22
Tabela 8	– Equipamentos para a colheita	22
Tabela 9	– Aplicação de adubo	25
Tabela 10	– Taxas de aplicação de fertilizantes – situação atual	25
Tabela 11	– Energia nos fertilizantes – situação atual	26
Tabela 12	– Utilização de equipamentos agrícolas – situação atual	27
Tabela 13	– Energia na produção e manutenção dos equipamentos	27
Tabela 14	– Custo energético dos equipamentos – situação atual	27
Tabela 15	– Energia do bagaço excedente a partir da produção de etanol	29
Tabela 16	– Energia nos insumos do setor industrial	30
Tabela 17	– Energia nas edificações e áreas de serviço	30
Tabela 18	– Energia na fabricação dos equipamentos	30
Tabela 19	– Energia correspondente a equipamentos e instalações industriais	31
Tabela 20	– Consumos para diversos equipamentos/materiais	31
Tabela 21	– Emissões de combustíveis fósseis	31
Tabela 22	– Emissões de metano na queima do canavial	34

Índice

Prefácio	9
Sumário executivo	10
Introdução	11
Objetivo	11
Metodologia	11
Base de dados	12
Definição dos sistemas e fluxos de emissões	13
Emissões	
Uso de combustível fóssil na produção de cana-de-açúcar	15
Uso de combustível fóssil na produção industrial de etanol	15
Emissões devidas ao uso de energia fóssil	17
Outras emissões na produção e no uso de etanol	17
Emissões evitadas	18
Balanço de emissões e conclusões	18
Anexos	
Anexo 1 – Uso de energia na produção de cana-de-açúcar	20
Anexo 2 – Uso de energia na produção industrial de etanol	28
Anexo 3 – Notas e dados complementares	32
Referências	37

Prefácio

Uma das principais tarefas da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo é melhorar a qualidade do ar das regiões metropolitanas do Estado. A adição de 20% a 25% de etanol na gasolina é uma importante contribuição nesse sentido.

A substituição da gasolina por álcool tem outra importante consequência, que é a redução das emissões de gases de efeito estufa (principalmente CO₂) se na produção de etanol a contribuição de combustíveis fósseis for minimizada. Essa contribuição provém da energia necessária à produção dos insumos que são usados na lavoura ou no processo industrial (fertilizantes, calcário, ácido sulfúrico, lubrificantes etc.), além da energia elétrica e dos combustíveis adquiridos para a unidade produtora (insumos energéticos diretos).

Para que o etanol seja considerado um combustível renovável (ou “quase renovável”), é essencial que a contribuição de combustíveis fósseis usados na sua produção seja pequena, assim como as emissões de gases de efeito estufa não associadas diretamente ao uso de combustíveis fósseis, em todo o seu ciclo de produção e utilização. Ao longo dos anos, avaliações dessa contribuição foram feitas por diversos grupos de especialistas com resultados altamente encorajadores.

Com o aumento do número de unidades produtoras da fabricação de etanol e os avanços da tecnologia, a Secretaria do Meio Ambiente julgou conveniente solicitar à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) uma atualização dessas avaliações. Essa atualização foi feita com dados obtidos também com o Centro de Tecnologia Copersucar (CTC/Copersucar). Este relatório é resultado desse trabalho.

Prof. José Goldemberg
Secretário do Meio Ambiente

A agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil é uma atividade econômica que, no plano da produção, representa 2,2% do PIB nacional. Fatura, anualmente, mais de US\$ 8 bilhões e gera aproximadamente um milhão de empregos diretos, 400 mil deles em São Paulo – maior Estado produtor do País – promovendo o desenvolvimento de um grande número de municípios brasileiros e contribuindo para a fixação do homem no campo.

O álcool etílico (etanol) e o bagaço, produtos energéticos da cana-de-açúcar, têm contribuído largamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, por serem substitutos de combustíveis fósseis, respectivamente, gasolina e óleo combustível.

Todavia, no plantio, na colheita, no transporte e no processamento da cana-de-açúcar são consumidos combustíveis fósseis que geram emissões de GEE. É preciso, portanto, fazer um balanço energético e de GEE para se avaliar quais os resultados líquidos no ciclo completo de produção do álcool de cana-de-açúcar e no seu uso como combustível no setor de transporte. Para facilidade de comparação com outros estudos, os dados de GEE são apresentados como emissões de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{eq.}$).

No balanço energético, foram considerados três níveis de fluxos energéticos para facilitar a comparação com outros balanços. Nível 1 – Considera-se apenas os combustíveis consumidos ou a energia elétrica adquirida (insumos energéticos diretos).

Nível 2 – Acrescenta-se a energia necessária à produção de outros insumos para a lavoura ou para o processo industrial (fertilizantes, calcário, mudas, ácido sulfúrico, lubrificantes etc.).

Nível 3 – Acrescenta-se a energia necessária para a produção e manutenção de equipamentos e instalações.

Devido à diversidade das bases de dados para os parâmetros técnicos de produção de cana-de-açúcar e álcool no âmbito nacional, foi utilizada uma base de dados menor, elaborada a partir de informações disponíveis na Copersucar, que, entretanto, apresenta a vantagem de rastreabilidade e referências consistentes.

Para avaliação dos fluxos de energia, são considerados dois casos: o Cenário 1 é baseado nas médias de consumo de energia e insumos e o Cenário 2 é baseado nos melhores valores praticados (valores mínimos de consumo com o uso da melhor tecnologia existente e praticada na região). Em ambos os cenários, baseados nos dados de produção de 2002, utiliza-se como referência a tonelada de cana-de-açúcar (TC).

Nessas condições, os resultados obtidos para o consumo de energia foram: 48.208 kcal/TC e 45.861 kcal/TC no setor agrícola para os cenários 1 e 2, respectivamente, e 11.800 kcal/TC e 9.510 kcal/TC no setor industrial para os cenários 1 e 2, respectivamente. Os totais do Cenário 1, 60.008 kcal/TC, e Cenário 2, 55.371 kcal/TC, comparam muito favoravelmente com a produção de energia (etanol e bagaço excedente) de 499.400 kcal/TC e 565.700 kcal/TC, nos cenários 1 e 2, respectivamente. A relação de energia produzida sobre energia consumida é de 8,3 e 10,2, para os cenários 1 e 2, respectivamente.

No balanço de GEE, as emissões foram divididas em dois grupos, um de emissões devidas ao uso de energia fóssil e outro com emissões de outras fontes (queima da palha e decomposição de fertilizantes).

Para o primeiro grupo, os valores calculados para os Cenários 1 e 2 foram de 19,2 kg $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{TC}$ e 17,7 kg $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{TC}$, respectivamente, e, para o segundo grupo, o resultado obtido foi de 12,6 kg $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{TC}$ em ambos os cenários.

As emissões evitadas pela substituição da gasolina pelo etanol e do óleo combustível pelo bagaço excedente, subtraídas dos valores acima, dão um resultado líquido de 2,6 t $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ e 2,7 t $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ de etanol anidro e 1,7 t $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ e 1,9 t $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ de etanol hidratado, para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Introdução

O setor sucroalcooleiro do Brasil tem um diferencial ambiental positivo, representado pela produção do álcool etílico, combustível limpo e renovável, oriundo da cana-de-açúcar. A utilização extensiva do álcool etílico como combustível automotivo no Brasil, seja em mistura de 25% com a gasolina, como combustível dos veículos equipados com motor a álcool ou, ainda, nos recentemente lançados veículos com tecnologia *flex fuel* que operam com gasolina, álcool ou qualquer mistura desses combustíveis, confere ao País liderança no cenário internacional quanto ao seqüestro de carbono e à mitigação do efeito estufa.

A produção de álcool etílico na safra 2003/2004 deve atingir o expressivo volume de 14,4 bilhões de litros, cabendo à região Centro-Sul, que inclui o Estado de São Paulo, a participação de 89,6% desse total.

Além da produção de álcool, o processamento da cana-de-açúcar para a produção de álcool e de açúcar resulta na geração do bagaço de cana-de-açúcar. Esse resíduo também representa um diferencial ambiental positivo na medida em que vem sendo aproveitado pelo setor como fonte de energia para a produção de calor industrial e de energia elétrica, substituindo o uso de derivados de petróleo e incrementando o potencial de redução da emissão de gases de efeito estufa.

O presente trabalho se constitui em uma contribuição para uma melhor apreciação do valor ambiental das energias renováveis e da eficiência energética desse importante segmento industrial.

Objetivo

Este trabalho apresenta a emissão de GEE no ciclo de vida da produção e no uso do etanol, nas condições típicas encontradas nas usinas e destilarias brasileiras. Consta do presente trabalho o cálculo das emissões derivadas do consumo de combustíveis fósseis e das emissões não relacionadas com o uso de energia.

Para elaboração deste trabalho, que

adota como referência os dados de 2002, foi preparada uma nova atualização dos dados referentes ao consumo energético da produção de etanol nas usinas da Copersucar, feito em 1985¹ com primeira atualização em 1998².

As observações feitas na época do primeiro relatório, principalmente quanto à importância da definição correta dos limites do processo analisado, continuam válidas. Alguns parâmetros levantados naquela época foram mantidos, em virtude da dificuldade prática para a sua atualização. Entretanto, não se considera esse fato relevante visto que a sua atualização teria pequeno impacto nos valores de consumo energético.

A avaliação das emissões de GEE na produção e no uso do etanol corresponde a uma atualização de alguns estudos anteriores feitos no CTC/Copersucar, que foram publicados em 1992³ e atualizados em 1998, com dados de 1996⁴.

Metodologia

Para a avaliação dos fluxos de energia, são considerados dois casos: um deles (Cenário 1) é baseado nas médias de consumo de energia, nos insumos e nos investimentos, e o outro (Cenário 2) é baseado nos melhores valores praticados (valores mínimos de consumo, com o uso da melhor tecnologia existente e praticada na região). A utilização desses cenários permite caracterizar não somente a situação atual (Cenário 1), mas também a situação que, embora já seja realidade em algumas unidades produtivas, poderá vir a ser prática comum em médio prazo (Cenário 2). Não são consideradas neste trabalho tecnologias em desenvolvimento ou aquelas que, embora sejam consideradas desenvolvidas, não são, ainda, utilizadas em grau significativo.

Tecnologias em processo de introdução gradual, que podem ter impacto importante nas emissões, são consideradas para o grau atual de sua utilização. É o caso da colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua (cana-de-açúcar que não sofre queima prévia da palha), sem a recuperação da palha para a geração de energia.

Para os fluxos de energia, os dados são considerados em três níveis, incluindo maior ou menor detalhamento na análise energética, para facilitar a comparação com outros estudos:

Nível 1 – Considera-se apenas os combustíveis consumidos ou a energia elétrica adquirida (insumos energéticos diretos).

Nível 2 – Acrescenta-se a energia necessária à produção de outros insumos para a lavoura ou para o processo industrial (fertilizantes, calcário, mudas, ácido sulfúrico, lubrificantes etc.).

Nível 3 – Acrescenta-se a energia necessária para a produção e manutenção de equipamentos e instalações.

Sempre que possível, foram utilizados parâmetros recomendados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) nas avaliações de emissões.

Base de dados

A existência de uma base de dados para todo o Brasil ainda não está devidamente estabelecida no setor sucroalcooleiro. Dessa forma, preferiu-se utilizar uma base de dados menor, porém mais confiável do ponto de vista da rastreabilidade das informações, da existência de procedimentos estabelecidos para coleta de dados e das análises laboratoriais. É importante ressaltar que a base de dados utilizada é representativa das práticas agrícolas e industriais praticadas no Brasil.

Com essas considerações, optou-se pela utilização dos seguintes documentos como

referência para os cálculos do balanço energético da produção de álcool no Brasil.

– Copersucar: Controle Mútuo Agrícola (CMA) (26 a 31 usinas de SP) – Esse documento apresenta dezenas de parâmetros de desempenho, na área agrícola, de um conjunto de usinas associadas à Copersucar; trata-se de uma elaboração que tem sido feita há anos, com médias mensais e anuais, e que é amplamente discutida entre os participantes.

– Copersucar: Controle Mútuo Industrial (CMI) (17 a 22 usinas de SP) – Esse documento apresenta, de modo análogo ao anterior, os parâmetros de desempenho (eficiências, insumos, produtividades etc.) para as áreas industriais de usinas da Copersucar. Também é amplamente discutido. Apresenta médias mensais de vários anos.

– Copersucar: Programa de Acompanhamento Mensal de Performance Agrícola (PAMPA) (98 usinas do Centro-Sul) – Esse documento apresenta dados agrícolas, em menor quantidade e com menor rastreabilidade das informações, porém para um conjunto bem maior de usinas do Centro-Sul.

Em alguns casos, nos quais os efeitos climáticos têm forte influência nos dados (como no caso da produtividade agrícola), foram obtidas médias de cinco safras consecutivas (1998/99 a 2002/2003). Para alguns parâmetros, o Controle Mútuo da safra 2001/02, tanto agrícola como industrial, foi usado para base de dados.

Definição dos sistemas e fluxos de emissões

Para avaliar a mitigação da emissão de GEE no ciclo de vida do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, adotou-se o conceito de produção exclusiva de etanol nas unidades produtoras, como se a produção ocorresse exclusivamente nas destilarias autônomas. Desse modo, os efeitos da produção de açúcar puderam ser desconsiderados.

A mitigação corresponde à redução do fluxo de emissões de GEE que foi obtida com a produção e o uso do etanol (como substituto da gasolina automotiva); portanto, é a diferença entre o fluxo de emissões que ocorreria se não houvesse a produção e o uso do etanol e o fluxo real com o etanol (ambos nas condições atuais do Brasil).

A análise do ciclo de vida utiliza um volume de controle correspondente às áreas de produção agrícola da cana-de-açúcar, à destilaria e inclui o uso final do etanol.

Para facilitar os cálculos, pode-se dividir os fluxos de emissões de GEE em quatro grupos:

Grupo 1:

Fluxos associados à fixação de carbono atmosférico por fotossíntese e à sua liberação gradual por oxidação:

- 1.a Fixação (fotossíntese) de carbono atmosférico;
- 1.b Liberação de carbono na queima do canavial antes da colheita (aproximadamente 80% das pontas e folhas são queimadas com eficiência de 90%);
- 1.c Oxidação dos resíduos não totalmente queimados no campo;
- 1.d Liberação de CO₂ na fermentação da sacarose para produção de etanol;
- 1.e Liberação de CO₂ na queima de todo o bagaço, para geração de energia, nas caldeiras da unidade produtora ou em outras;
- 1.f Liberação de CO₂ na queima do etanol em motores automotivos.

Esse conjunto de fluxos é considerado praticamente "neuro", pois admite-se que todo o carbono fixado é liberado novamente dentro do ciclo de produção de cana-de-açúcar e na utilização final do etanol e do bagaço. A exceção é a fixação de parte do carbono no solo (nos canaviais brasileiros das últimas

décadas, a fixação, em média, é positiva, porque a maioria das terras era relativamente pobre em matéria orgânica). Neste estudo, pela dificuldade em estimar o valor fixado (que deve ser uma fração pequena do total reciclado), optou-se por uma posição conservadora, sendo assumido que não há fixação no solo.

Portanto, a contribuição líquida dos fluxos do Grupo 1 é admitida como igual a zero (hipótese normalmente feita em produção/uso cíclicos de biomassa).

Grupo 2:

Fluxos associados aos usos de combustíveis fósseis na produção de todos os insumos agrícolas e industriais para a produção de cana e etanol; e também na produção de equipamentos (agrícolas e industriais) e construção de prédios e instalações:

- 2.a Liberação de CO₂ pelo uso de combustíveis fósseis na lavoura: tratos culturais, irrigação, colheita, transporte da cana-de-açúcar etc.;
- 2.b Liberação de CO₂ correspondente ao combustível fóssil usado na produção dos insumos da lavoura (mudas, herbicidas, pesticidas, fertilizantes etc.);
- 2.c Liberação de CO₂ correspondente ao combustível fóssil usado na fabricação dos equipamentos agrícolas e das peças de reposição e manutenção;
- 2.d Liberação de CO₂ correspondente ao uso de combustíveis na fabricação de insumos para a indústria (cal, H₂SO₄, biocidas etc.);
- 2.e Liberação de CO₂ correspondente ao combustível usado na produção de equipamentos e na construção de prédios e instalações industriais.

Esses fluxos são negativos pois contribuem para o aumento das emissões.

Grupo 3:

Os fluxos não associados ao uso de combustíveis fósseis são principalmente o óxido nitroso (N₂O) e o metano (CH₄), embora outros GEE de muito menor importância possam ocorrer. Podem ser assim caracterizados:

- 3.a Liberação de outros GEE (não CO₂) no processo de queima do canavial;
- 3.b Liberação de N₂O do solo (decorrente da adubação nitrogenada);
- 3.c Emissões de outros GEE (não CO₂) na queima do bagaço em caldeiras;
- 3.d Emissões de outros GEE (não CO₂) na combustão do etanol, nos motores.

Esses fluxos também são negativos (contribuem para o aumento das emissões).

Grupo 4:

Esse grupo inclui os chamados fluxos "virtuais", que correspondem às emissões de GEE que ocorreriam se, na ausência do etanol, a demanda fosse suprida por gasolina automotiva e, na ausência do bagaço excedente, fosse utilizado óleo combustível em outras indústrias. Essas emissões podem ser assim caracterizadas:

4.a Emissões evitadas de GEE pelo "não uso" de gasolina, substituída pelo etanol;

4.b Emissões evitadas de GEE pelo "não uso" de óleo combustível em outras indústrias, substituído pelo excedente de bagaço.

Na análise a seguir, os fluxos dos grupos 2 a 4 foram avaliados e, pelas razões apresentadas anteriormente, não foi necessário medir os fluxos do Grupo 1. Apenas para auxiliar no entendimento de algumas hipóteses, é preciso esclarecer que os fluxos dos grupos 2 e 3 são cerca de dez vezes menores do que os do Grupo 4. Em geral, isso é verdade para sistemas de combustíveis fósseis ou biomassa, em que as energias "embutidas" nos equipamentos e nos sistemas são muito pequenas quando comparadas com os fluxos de energia "convertidos" na vida útil dos sistemas, o mesmo ocorrendo com as energias usadas para os insumos. Há, entretanto, algumas exceções, como é o caso do etanol produzido a partir do milho, nos EUA.

Uso de combustível fóssil na produção de cana-de-açúcar

A análise detalhada está no Anexo 1. Os três níveis de consumo energético considerados para a produção de cana-de-açúcar são:
 Nível 1 – Combustíveis nas operações agrícolas e no transporte da cana-de-açúcar.
 Nível 2 – Outros insumos: fertilizantes, calcário, herbicidas, inseticidas, mudas.
 Nível 3 – Energia para a produção e manutenção de equipamentos, mão-de-obra.

Para o Nível 1 (combustíveis), os consumos de energia associados ao combustível (diesel) podem ser computados no valor energético do diesel (PCI = 9.235 kcal/l mais 2.179 kcal/l para produção, transporte e processamento = 11.414 kcal/l). Observamos, no entanto, que se o objetivo final fosse apenas verificar a fração de autoconsumo de energia de mesma qualidade na produção de álcool, sem preocupação com o ciclo de vida, o diesel na forma final deveria ser considerado com o valor do PCI. Para o óleo combustível, os valores são equivalentes aos do diesel⁵. Algumas considerações adicionais sobre esses valores estão no Anexo 3, Nota 1.

O resumo dos resultados para a situação atual é apresentado na Tabela 1. Nesse resumo, não se faz distinção entre as formas de energia (como usualmente a energia elétrica é computada pelo seu equivalente

termodinâmico, ou seja, o valor da energia térmica transformada na sua obtenção), mas o detalhamento completo está discutido no Anexo 3, Nota 2.

Uso de combustível fóssil na produção industrial de etanol

A análise detalhada está no Anexo 2.

Na industrialização da cana-de-açúcar para a produção de etanol, há três fatores que devem ser considerados no custo energético total:
 Nível 1 – A aquisição de energia elétrica, se houver.
 Nível 2 – A energia necessária para a produção dos insumos para o processo industrial (produtos químicos, lubrificantes).

Nível 3 – A energia para a construção das edificações e dos equipamentos industriais e de sua manutenção.

Resumo dos resultados, para os três níveis e dois cenários, é apresentado na Tabela 2 (*na página 11*), sem distinção entre formas de energia (*ver Anexo 3, Nota 2*).

Conforme notado no balanço energético do setor (Anexo 2), há uma produção de excedentes de energia, como bagaço, que será considerada na análise do conjunto, correspondendo a 40.300 kcal/TC (Cenário 1) ou 75.600 kcal/TC (Cenário 2).

Uma comparação entre a energia produzida no processo, na forma de bagaço excedente e etanol, e a energia fóssil consumida está na Tabela 3. Pode ser

Tabela 1 – Consumo de energia na produção de cana-de-açúcar

Nível/insumo agrícola	Consumo de energia	
	Cenário 1 kcal/TC	Cenário 2 kcal/TC
Combustível		
1 Operação agrícola e colheita (A2)	9.097	9.097
Transporte (A3)	10.261	8.720
Subtotal	19.358	17.817
Fertilizantes (A4)	15.890	15.152
Calcário (A5)	1.706	1.706
2 Herbicidas	2.690	2.690
Inseticidas	190	190
Mudas (A6)	1.404	1.336
Subtotal	21.880	21.074
3 Equipamentos (A7)	6.970	6.970
Subtotal	6.970	6.970
Total	48.208	45.861

notado que a relação é de oito a dez vezes muito maior do que para o caso de álcool de milho americano.

A representação dos fluxos de energia

pelos volumes de controle agrícola e industrial está representada na Figura 1 (ver página 17) para o Cenário 1.

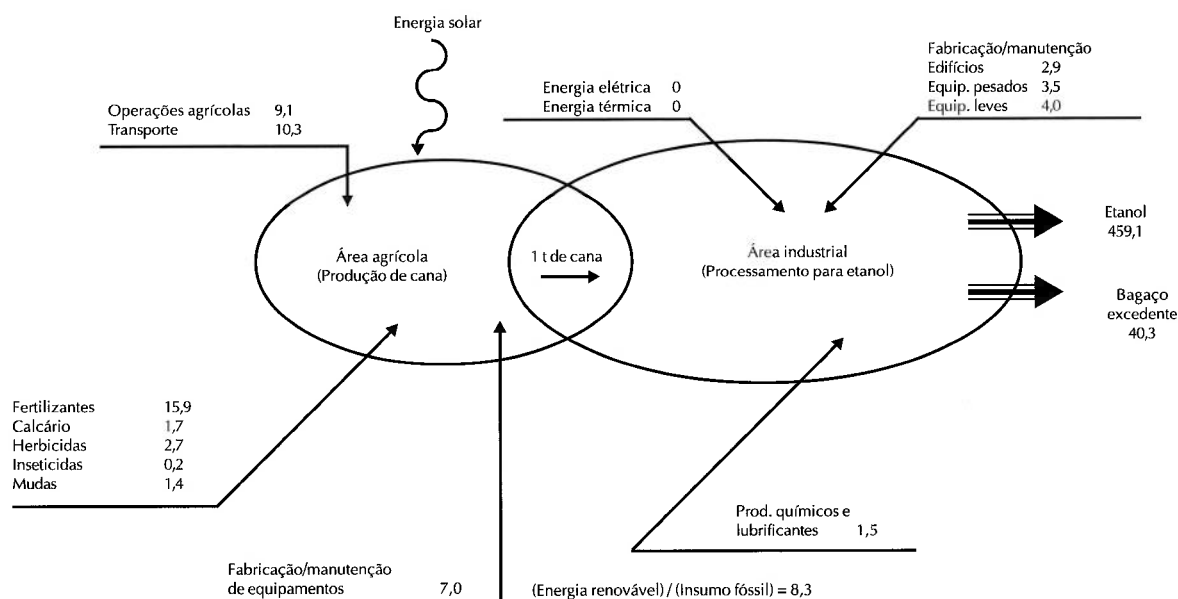
Tabela 2 – Consumo de energia na produção de etanol

Nível	Consumo de energia	
	Cenário 1 kcal/TC	Cenário 2 kcal/TC
1 Energia elétrica	0	0
2 Produtos químicos e lubrificantes (A9)	1.520	1.520
Edificações (A10)	2.860	2.220
3 Equipamentos pesados	3.470	2.700
Equipamentos leves	3.950	3.070
Total	11.800	9.510

Tabela 3 – Consumo e geração de energia na produção de cana-de-açúcar e etanol

Atividade/item	Consumo de energia			
	Cenário 1 (kcal/TC)		Cenário 2 (kcal/TC)	
Produção de cana-de-açúcar (total)	48.208		45.861	
Operações agrícolas	9.097		9.097	
Transporte	10.261		8.720	
Fertilizantes	15.890		15.152	
Cal, herbicidas, pesticidas etc.	4.586		4.586	
Mudas	1.404		1.336	
Equipamentos	6.970		6.970	
Produção de etanol (total)	11.800		9.510	
Eletricidade (comprada)	0		0	
Produtos químicos, lubrificantes	1.520		1.520	
Prédios e instalações	2.860		2.220	
Equipamentos	7.429		5.770	
Fluxos externos de energia	Insumo	Produção	Insumo	Produção
Agricultura	48.208	-	45.861	-
Indústria	11.800	-	9.510	-
Etanol produzido	-	459.100	-	490.100
Bagaço excedente	-	40.300	-	75.600
Total	60.008	499.400	55.371	565.700
Produção/insumo	8,3		10,2	

Figura 1 – Balanço de energia do sistema considerado – Cenário 1 (M cal/TC)



Emissões devidas ao uso de energia fóssil

Todos os usos de combustíveis fósseis listados nas Tabelas 1 e 2 são considerados aqui, incluindo usos diretos e indiretos. Os valores de usos indiretos de energia para os combustíveis, assim como os coeficientes de emissão de carbono na sua queima, podem ser encontrados no Anexo 3, Nota 2.

Foi considerado o uso de óleo diesel para operações agrícolas, colheita e transporte; e óleo combustível para a produção de insumos (agrícolas e industriais) e para a energia "embutida" em equipamentos, prédios e instalações. Essa simplificação é aceitável, considerando a estrutura de uso de energia para esses fins e as pequenas magnitudes envolvidas.

Os consumos totais de diesel são de 19.358 kcal/TC e 17.817 kcal/TC (cenários 1 e 2).

Os consumos de óleo combustível são de 40.650 kcal/TC e 37.554 kcal/TC (cenários 1 e 2).

As emissões de GEE, medidas em CO₂eq. são de 19,2 kg CO₂eq./TC e 17,7 kg CO₂eq./TC, para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Outras emissões na produção e no uso de etanol

São consideradas aqui as emissões na agricultura da cana-de-açúcar, na indústria de produção do etanol e no uso final (automotivo) que não são relacionadas com o uso de combustíveis fósseis. As principais são:

- A emissão de CH₄ e N₂O na queima da palha da cana-de-açúcar (palha), antes da colheita;
- A emissão de N₂O do solo;
- A emissão de CH₄ na queima de bagaço em caldeiras;
- A emissão de CH₄ nos motores automotivos ope-

rando com etanol, em comparação com os motores a gasolina.

Emissões da queima de cana-de-açúcar no campo, antes da colheita

Foram utilizados valores calculados a partir de coeficientes de emissão medidos em túnel de vento, especialmente para a cana-de-açúcar⁶, e valores "médios" para resíduos do IPCC⁷ (ver Anexo 3, Nota 4).

Os valores do IPCC são maiores e, adotando uma posição conservadora (evitando subestimar as emissões), foram adotados. O resultado, de 9,0 kg CO₂eq./TC, é detalhado no Anexo 3, Nota 4.

Emissão de N₂O do solo

As avaliações baseadas no uso de adubação nitrogenada (Anexo 3, Nota 5) consideram que, nas condições do Centro-Sul do Brasil, cerca de 28 kg N/ha são usados no plantio da cana-de-açúcar e 87 kg N/ha para cada soqueira, resultando em 75 kg N/(ha.ano) para o ciclo; a maior parte do fertilizante é do tipo NH₄.

O resultado é a emissão de 1,76 kg N₂O/(ha.ano). Como o N₂O tem um potencial de intensificação do efeito estufa 296 vezes maior do que o do CO₂, isso corresponde a 521 kg CO₂eq./ha.ano, ou 6,3 kg CO₂eq./TC.

Emissões de CH₄ na queima de bagaço em caldeiras

Emissões de compostos orgânicos não queimados, incluindo metano, só ocorrem em concentrações significativas durante operação transiente ou perturbações não controladas do

processo de combustão. Embora a maioria das caldeiras não tenha lavadores de gás, a sua operação é praticamente contínua durante a maior parte do tempo de produção de etanol, o que minimiza substancialmente a emissão de metano e, dessa forma, esse componente das emissões foi desprezado; o poluente mais significativo emitido pelas caldeiras é o material particulado.

Emissão de CH₄ nos motores automotivos operando com etanol e misturas gasolina-etanol, em comparação com os motores a gasolina.

Conforme mostrado no Anexo 3, Nota 6, embora seja difícil medir diferenças entre emissões em motores a etanol e gasolina (porque não há uso de motores a gasolina pura no Brasil), a evolução tecnológica para os motores usados hoje no Brasil (etanol e mistura gasolina-etanol) que possibilitou o pleno atendimento dos limites legais de emissão também resultou em emissões de metano muito pequenas em relação aos outros itens considerados neste balanço e que, portanto, podem ser desprezadas. Por outro lado, como discutido no referido anexo, também não foram considerados efeitos potencialmente benéficos da utilização de etanol.

Emissões evitadas

Emissões de GEE são evitadas pelo uso do bagaço excedente como combustível em outras unidades industriais, substituindo o óleo combustível, e pelo uso do etanol como combustível automotivo, substituindo a gasolina. No futuro próximo, parte do bagaço (e da palha) poderão produzir quantidades apreciáveis de energia elétrica adicional e também de etanol, contribuindo para evitar uma quantidade adicional de emissões de GEE.

Bagaço excedente

A análise referente ao bagaço excedente está no Anexo 3, Nota 7.

São produzidos 280 kg bagaço/TC, com 50% de umidade. Os excedentes são de 8% e 15% (cenários 1 e 2, respectivamente); com isso, a energia excedente é de 40.300 kcal/TC e 75.600 kcal/TC, nos dois cenários (*ver Anexo 2*).

Para estimar as emissões evitadas quando esse excedente substitui óleo combustível, foram estabelecidas as condições operacionais para os dois sistemas. Nessas condições (*ver Anexo 3, Nota 7*) os excedentes de bagaço de 8% e 15% correspondem, em termos de energia final (uso), a 3,2 kg óleo combustível/TC e 6,1 kg óleo combustível/TC substituído.

As emissões totais evitadas (incluindo as emissões indiretas), relativas às quantidades de óleo

combustível consideradas, correspondem a 12,5 kg CO₂eq./TC e 23,3 kg CO₂eq./TC, para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Etanol

Com a produtividade média atual nas unidades produtoras (álcool anidro e hidratado), e com as emissões totais (diretas e indiretas) da gasolina substituída (Anexo 3, Nota 8), a equivalência observada nos motores nacionais foi utilizada para avaliar as emissões evitadas com o uso do etanol, nas duas formas. O detalhamento é apresentado no Anexo 3, Nota 8.

As emissões evitadas correspondem a:

2,82 kg CO₂/l etanol anidro

1,97 kg CO₂/l etanol hidratado

ou, relacionando com a produção de cana-de-açúcar:

Etanol anidro: 242,5 kg CO₂/TC ou 259 kg CO₂/TC, cenários 1 e 2, respectivamente.

Etanol hidratado: 169,4 kg CO₂/TC ou 180,8 kg CO₂/TC, cenários 1 e 2 respectivamente.

Balanço de emissões e conclusões

O resumo dos resultados para as emissões de GEE apresentados acima se encontra na Tabela 4 (*ver página 19*)

Os valores são alternativos, isto é, evita-se 242,5 kg CO₂eq./TC se a produção for de etanol anidro, ou 169,4 kg CO₂ eq./TC se for produzido etanol hidratado.

Para muitas avaliações, é conveniente ter esses dados expressos em emissões evitadas (valor líquido) por m³ de etanol, anidro ou hidratado. A conversão pode ser feita pelas produtividades, nos dois cenários, levando a:

Emissões evitadas (valores líquidos) por m³ etanol:

Etanol anidro: 2,6 t CO₂eq./m³ etanol e 2,7 t CO₂ eq./m³ etanol (cenários 1 e 2)

Etanol hidratado: 1,7 t CO₂eq./m³ etanol e 1,9 t CO₂ eq./m³ etanol (cenários 1 e 2)

O valor para o Cenário 1 (médias atuais), por ser mais representativo da situação atual, é o recomendado para avaliações relativas à emissão de GEE.

A Figura 2 (*na página 19*) mostra as emissões correspondentes aos volumes de controle agrícola, industrial e uso dos produtos álcool e bagaço excedente (Cenário 1).

Tendo como referência o consumo de cerca de 12 milhões de m³ por ano de etanol, sendo, aproximadamente, a metade em anidro, pode-se dizer que o etanol é responsável pela redução de cerca de 25,8 milhões t CO₂eq., ou 7 milhões de toneladas de carbono equivalente. O setor de cana-de-açúcar traz, ainda, uma outra parcela considerável de contribuição para mitigar emissões com o uso do bagaço (na usina) para a produção de açúcar.

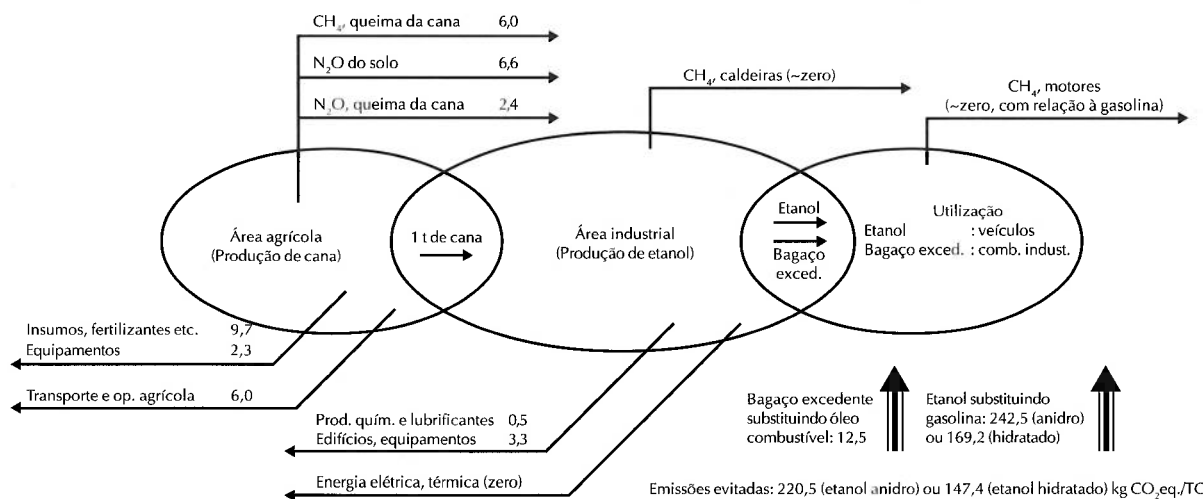
Tabela 4 – Emissões no ciclo de vida do etanol

Emissões no ciclo de vida do etanol	kg CO ₂ eq./TC	
	Cenário 1 (média)	Cenário 2 (melhores valores)
Emissões		
Combustíveis fósseis	19,2	17,7
Metano e N ₂ O, queima da palha	9,0	9,0
N ₂ O do solo	6,3	6,3
Total de emissões	34,5	33,0
Emissões evitadas		
Uso do bagaço excedente	12,5	23,3
Uso do etanol	242,5 (A); 169,4 (H)	259,0 (A); 180,8 (H)
Total de emissões evitadas	255,5 (A); 181,9 (H)	282,3 (A); 204,2 (H)
Emissões evitadas (valor líquido)	220,5 (A); 147,4 (H)	249,3 (A); 171,2 (H)

(A): etanol anidro

(H): etanol hidratado

Figura 2 – Emissões de GEE (*) do sistema considerado – Cenário 1 (kg CO₂eq./TC)



(*) Excluindo o ciclo da fotossíntese, porque todo o carbono fixado anualmente pela planta é liberado como CO₂ (queima do bagaço e queima/oxidação da palha; queima do etanol; fermentação), a menos da pequena parcela que é fixada no solo.

Anexo 1 – Produção de cana-de-açúcar

Introdução

Os dados utilizados referem-se ao ano de 2002, para as usinas associadas à Copersucar. Na situação atual, alguns dados básicos quanto à colheita e às características da cana-de-açúcar foram avaliados como:

Colheita de cana-de-açúcar – situação atual⁸

Tipo de colheita	São Paulo (%)	Centro-Sul (%)
Manual	63,8	65,2
Mecânica	36,2	34,8
Cana queimada	75,0	79,1
Cana crua	25,0	20,9

Considerando que cerca de 85% da produção de álcool no Brasil ocorre na região Centro-Sul, a seguinte situação foi assumida para o Brasil:

Colheita mecanizada	35%
Colheita manual	65%
Cana colhida queimada	80%
Cana colhida crua	20%

Por simplicidade, toda cana-de-açúcar colhida crua foi considerada como colheita mecanizada. É importante reconhecer que essa simplificação resulta em uma análise mais conservadora.

Esses dados foram utilizados na determinação dos equipamentos necessários para as operações agrícolas.

– Pol e fibra

Considerando a média de cinco safras consecutivas (1998/99 a 2002/03) e os dados do CMA⁹, obteve-se:

Pol % cana	14,53%
Fibra % cana	13,46%

A1: Produtividade agrícola

As médias entre diversas regiões e variedades – Centro de Tecnologia Copersucar (CTC) – podem ser verificadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Produtividade da cana-de-açúcar (médias das safras 1998/99 a 2002/03 – Copersucar)

Corte	Produtividade (t/ha)
1º – Cana planta de 18 meses	113 (80%) } 77 (20%) } \bar{X} ponderada = 106
Cana planta de 12 meses	
2º – 1ª soca	90
3º – 2ª soca	78
4º – 3ª soca	71
5º – 4ª soca	67
Média de 5 cortes	82,4 t/ha (68,7 t/ha.ano)

Idade média de reforma⁹:

Safra 99/00	5,13 cortes
Safra 00/01	5,18 cortes
Safra 01/02	5,33 cortes

Normalmente, são realizados cinco cortes (média de 82,4 t/ha). As soqueiras são cortadas após um ano e a cana-planta dois anos após o corte de soqueira anterior para cana-de-açúcar de 18 meses. A média, portanto, para cinco cortes, é de 68,7 t/ha.ano.

A2: Operações agrícolas e colheita

a) Operações agrícolas

Nas operações agrícolas, os equipamentos utilizados e as suas capacidades estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Operações agrícolas: equipamentos

Nº	Equipamentos	Pot. (CV)	Implementos	Cap.Trab. (ha/h)	Consumo (l diesel/h)
1	MF 290	78	Carreta distribuidora de calcário	1,61	6,0
2	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	1,30	27,6
3	CAT D-6	165	Subsolador de 5 hastes	1,00	26,0
4	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	1,35	27,6
5	Valmet 1780	165	Grade leve 48 D x 20"	1,60	15,0
6	MF 680	170	Sulcador adubador duplo	1,10	15,0
7	MF 275	69	Carreta para plantio	0,60	4,0
8	MF 275	69	Cobridor de cana de 2 linhas	1,80	4,8
9	MF 275	69	Bomba de herbicida	2,50	4,0
10	MF 292	104	Cultivador para quebra do meio	1,30	8,0
11	MF 275	69	Aleirador de palha	1,50	4,0
12	Valmet 1580	143	Cultivador tríplice operação	1,30	9,2
13	Valmet 1580	143	Eliminador mecânico de soqueira	1,10	12,2
14	Case A-7700	330	Colhedora de cana combinada	45,0 t/h	40,4
15	MF 290 RA	78	Carregadora de cana	46,0 t/h	7,1
16	MB 2318	180	Transporte de cana (truck = 8%)	2,2 km/l	-
17	MB 2325	250	Transporte de cana (RJ = 25%)	1,6 km/l	-
18	Volvo	360	Transporte de cana (trem./rodot. = 67%)	1,2 km/l	-
19	MB 2318	180	Basculante	2,0 km/l	-
20	MB 2213	130	Carroceria transporte de adubo	2,0 km/l	-
21	MB 2318	180	Transporte de vinhaça (truck)	2,2 km/h	-
22	MB 2220	200	Transporte de vinhaça (RJ)	2,0 km/l	-
23	Volvo	360	Transporte de vinhaça (rodotrem)	1,3 km/l	-
24	Motobomba	120	Aplic. de vinhaça (aspersão/cam. aspersão)	120 m /h	14,0
25	Valtra BH 180	180	Reboque de julieta/transbordo	35,0 t/h	9,0

Os valores acima foram obtidos no banco de dados do projeto de pesquisa e desen-volvimento¹⁰. Tais dados foram ajustados para considerar a representatividade das usinas e das operações, quando necessário.

A seqüência normal das operações agrícolas é mostrada na Tabela 7.

Observações:

- A análise da compactação do solo permite reduzir a área subsolada em 30%.
- O cultivo mecânico (quebra do meio) está em torno de 70% da área de plantio, após o cultivo químico.

O consumo total de energia nas operações agrícolas pode ser calculado com base na Tabela 7.
Tabela 7 – Consumo de óleo diesel nas operações agrícolas

Nº	Operações agrícolas	Equip.	Capacidade de trabalho (ha/h)	Consumo específico (l/ha)	Fração da área trabalhada
Operações para preparo de solo e plantio (20% da área total)					
1	Aplicação de calcário	1	1,61	3,73	1,00
2	Eliminação mecânica de soqueira	13	1,10	11,09	0,30
3	Eliminação química de soqueira	9	2,50	1,60	0,30
4	Gradagem pesada I	2	1,30	21,23	0,90
5	Subsolagem	3	1,00	26,00	0,70
6	Gradagem pesada II	4	1,35	20,44	0,70
7	Gradagem pesada III	4	1,35	20,44	0,30
8	Gradagem de acabamento	5	1,60	9,38	0,90
9	Sulcação e adubação	6	1,10	13,64	1,00
10	Distribuição de mudas	7	0,60	6,67	1,00
11	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	8	1,80	2,67	1,00
12	Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	1,00
13	Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)	10	1,30	6,15	0,70
Operações para tratos culturais de cana soca (80% da área total)					
1	Aleiramento de palha	11	1,50	2,67	0,25
2	Cultivo tríplice operação	12	1,30	7,08	1,00
3	Cultivo químico (aplic. de herbicida)	9	2,50	1,60	0,85

Os valores de consumo nas operações agrícolas independem dos cenários 1 e 2:

Cana-planta: $C_p = 102,6$ l/ha

Cana soca: $C_s = 9,1$ l/ha

b) Colheita

Para os equipamentos 14 e 15 da Tabela 4, com produtividade média de 82,4 t/ha, temos os resultados da Tabela 8.

Tabela 8 – Equipamentos para a colheita

Equipamento	Capacidade operacional (ha/h)	Consumo específico (l/ha)
Colhedora Case	0,5461	74,0
Carregadora Santal	0,5583	12,7
Reboque de Julieta/Transbordo	0,4248	21,2

Memória de cálculo:

Colhedora Case:

$$\text{Capacidade operacional} = 45 \frac{\text{t}}{\text{h}} \times \frac{1}{82,4} \frac{\text{ha}}{\text{t}} = 0,5461 \text{ ha/h}$$

$$\text{Consumo específico} = 40,4 \frac{\text{l}}{\text{h}} \times \frac{1}{0,5461} \frac{\text{h}}{\text{ha}} = 74,0 \text{ l/ha}$$

Carregadora Santal:

$$\text{Capacidade operacional} = 46,0 \frac{\text{t}}{\text{h}} \times \frac{1}{82,4} \frac{\text{ha}}{\text{t}} = 0,5583 \text{ ha/h}$$

$$\text{Consumo específico} = 7,10 \frac{\text{l}}{\text{h}} \times \frac{1}{0,5582} \frac{\text{h}}{\text{ha}} = 12,7 \text{ l/ha}$$

Reboque de Julieta/Transbordo:

$$\text{Capacidade operacional} = 35,0 \frac{\text{t}}{\text{h}} \times \frac{1}{82,4} \frac{\text{ha}}{\text{t}} = 0,4248 \text{ ha/h}$$

$$\text{Consumo específico} = 9,0 \frac{\text{l}}{\text{h}} \times \frac{1}{0,4248} \frac{\text{h}}{\text{ha}} = 21,2 \text{ l/ha}$$

A situação atual pode ser descrita como segue.

No ciclo de seis anos, realiza-se uma reforma, quatro tratos culturais em soqueira e cinco cortes, sendo 35% com colheita mecânica (15% cana-de-açúcar queimada, 20% cana-de-açúcar crua) e 65% corte manual e carregamento mecânico⁸. O consumo de diesel nas operações agrícolas e de colheita anualmente é dado por:

$$C_{AC}(1/TC) = \frac{1}{P_A} \{0,17C_P + 0,67C_S + 0,83[0,35(C_{CC} + C_{TR}) + 0,65(C_{CM} + \frac{2}{3}C_{TR})]\}$$

Em que C_{CC} e C_{CM} (l/ha) são o consumo na colheita com máquina e manual, respectivamente, C_{TR} é o consumo dos tratores-reboque de julieta ou transbordos e P_A é a produtividade agrícola anual, TC/(ha.ano).

Observação: Para o corte manual, considerou-se o transporte em treminhões, o que implica numa participação do trator-reboque de julieta em 2/3 da cana-de-açúcar total.

Os resultados obtidos são:

Cenários 1 e 2: $C_{AC} = 0,797 \text{ l/TC}$

A3: Transporte

Todos os valores de capacidade e consumo utilizados são dados da Referência 9.

Transporte de cana-de-açúcar da lavoura até a usina

As medidas de consumo específico variam em função do tipo de caminhão e da distância. A média de transporte é de 20 km. Com base na Tabela 4 e na contribuição de cada tipo de caminhão no transporte da cana-de-açúcar: Truck (15 t) = 8%, para o Cenário 1, RJ (28 t) = 25% e Treminhão/Rodotrem (45 t) = 67%, obteve-se 20,4 ml/t.km para o Cenário 1.

Memória de cálculo:

$$\text{Truck} = \frac{1}{2,2} \frac{\text{l}}{\text{km}} \times \frac{1}{15\text{t}} \times 1.000 \frac{\text{ml}}{\text{l}} = 30,3 \frac{\text{ml}}{\text{t.km}}$$

$$\text{RJ} = \frac{1}{1,6} \frac{\text{l}}{\text{km}} \times \frac{1}{28\text{t}} \times 1.000 \frac{\text{ml}}{\text{l}} = 22,3 \frac{\text{ml}}{\text{t.km}}$$

$$\text{Trem} = \frac{1}{1,2} \frac{\text{l}}{\text{km}} \times \frac{1}{45\text{t}} \times 1.000 \frac{\text{ml}}{\text{l}} = 18,5 \frac{\text{ml}}{\text{t.km}}$$

$$\bar{X}_{\text{ponderada}} = 20,4 \frac{\text{ml}}{\text{t.km}}$$

$$\text{Rodotrem com 58 t} = \frac{1}{1,1} \frac{\text{l}}{\text{km}} \times \frac{1}{58\text{t}} \times 1.000 \frac{\text{ml}}{\text{l}} = 15,7 \frac{\text{ml}}{\text{t.km}}$$

O uso de caminhões de maior capacidade de carga leva a índices melhores; caso típico é o Volvo FH (consumo específico = 15,7 ml/t.km), que é tomado como base para o Cenário 2.

Resultados:

Cenário 1: $C_{TC} = 0,816 \text{ l/TC}$

Cenário 2: $C_{TC} = 0,628 \text{ l/TC}$

Transporte de mudas

Para um consumo de 12 t de mudas/ha, para distância média de 20 km, o caminhão MB2318 leva a $C_{TM} = 17,4 \text{ l/ha}$.

Truck com 12 t de carga: 2,3 km/l $\rightarrow \frac{1}{2,3} \times 40 = 17,4 \text{ l/ha}$

Torta de filtro

Nos casos em que a torta de filtro é aplicada, ela é distribuída em 30% da área de reforma do canavial. Na situação atual, apenas no Cenário 2 considera-se a aplicação de torta de filtro.

Um caminhão-basculante (tipo MB2213), com carga média de 8 t e consumo de 2,5 km/l, é utilizado para a aplicação; a distância média é de 8 quilômetros e a taxa de aplicação é de 12 t (úmidas)/ha, ou seja, 5 t (secas)/ha.

Resultado: $C_{TF} = 9,6 \text{ l/ha}$

Vinhaça

Na situação atual, apenas para o Cenário 2 considera-se aplicação em 30% da área de soqueiras. As formas de aplicação são:

Caminhão aplicando diretamente – 6% da área – dosagem 100 m³/ha (MB2318 com tanque de 15 m³), distância média de 7 km;

Sistema de aspersão aplicando – 63% da área – dosagem de 150 m³/ha (motobomba em canal – canal + montagem direta ou canal + rolão);

Caminhão com aspersão combinado com motobomba – 31% da área – dosagem 100 m³/ha com caminhão Volvo rodotrem = 100% com dois tanques de 30 m³/cada e distância econômica de até 12 km.

Memória de cálculo:

$$\text{Caminhão (direto)} = \frac{1}{2,2} \frac{\text{l}}{\text{km}} \times \frac{14 \text{ km}}{15 \text{ m}^3} \times 100 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}} = 42,4 \frac{\text{l}}{\text{ha}} \times 0,06 = 2,54 \frac{\text{l}}{\text{ha}}$$

$$\text{Aspersão (canal)} = 16 \frac{\text{l}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{120 \text{ m}^3} \times 150 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}} = 20 \frac{\text{l}}{\text{ha}} \times 0,63 = 12,6 \frac{\text{l}}{\text{ha}}$$

$$\text{Cam.+asp. (rodo)} = \frac{1}{1,3} \frac{\text{l}}{\text{km}} \times \frac{24 \text{ km}}{60 \text{ m}^3} \times 100 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}} = 30,8 \frac{\text{l}}{\text{ha}} \times 0,31 = 9,55 \frac{\text{l}}{\text{ha}}$$

$$\bar{X}_{\text{ponderada}} = 24,7 \frac{\text{l}}{\text{ha}}$$

Resultado: $C_{TV} = 24,7 \text{ l/ha}$

Adubo

No Cenário 2 da situação atual, considerou-se a redução do adubo aplicado em 30% da área plantada pelo uso de torta de filtro e vinhaça. Valores usuais são os da Tabela 9.

Trabalha-se tipicamente com o caminhão MB2213 (carga média de 12 t, 2,5 km/l). Para distância média de 20 km, no ciclo de seis anos entre reformas consecutivas do canavial, temos:

Cenário 1: 2.500 kg adubo/ha, $C_{TA} = 3,33$ l/ha

Cenário 2: 1.200 kg adubo/ha, $C_{TA} = 1,60$ l/ha

Tabela 9 – Aplicação de adubo

	Cana-planta	Cana soca	Total
Cenário 1	500 kg/ha (6-24-24)	500 kg/ha (16-5-24)	2.500 kg/ha (em 6 anos)
Cenário 2*	400 kg/ha (0-12,5-20)	200 kg uréia	1.200 kg/ha (em 6 anos)

*Áreas com aplicação de torta de filtro e vinhaça (30%).

A quantidade de adubo é calculada considerando que apenas 30% da área pode ser tratada com vinhaça e torta de filtro hoje.

Mostra-se que os diversos consumos podem ser associados à produtividade agrícola levando ao consumo total no transporte de acordo com:

$$\text{Cenário 1: } C_T = C_{TC} + \frac{1}{P_A} \{0,17C_{TM} + 0,83C_{TA}\} = 0,8991/TC$$

$$\text{Cenário 2: } C_T = C_{TC} + \frac{1}{P_A} \{0,17C_{TM} + 0,7(0,83C_{TA}) + 0,3(0,17C_{TT} + 0,67C_{TV})\} = 0,7641/TC$$

A4: Fertilizantes

A variação de taxa de aplicação é grande, dependendo do solo. Valores médios são mostrados na Tabela 10.

O Cenário 1 representa a adubação convencional, enquanto o Cenário 2 supõe a aplicação de torta de filtro em áreas de reforma e vinhaça nas áreas de soqueiras.

Considerando que apenas 30% dessas áreas podem ser tratadas assim, os valores finais de consumo dos dois cenários são apresentados na Tabela 11 (ver página 26).

Os custos energéticos específicos são conhecidos⁵.

Resultados finais:

Situação atual:

Cenário 1: $E_f = 15.890$ kcal/TC

Cenário 2: $E_f = 15.890 \times 0,7 + 13.430 \times 0,3 = 15.152$ kcal/TC

Tabela 10 – Taxas de aplicação de fertilizantes – situação atual

Fases da lavoura Macronutriente:	Taxa de aplicação (kg/ha)			
	Cana-planta		Cana soca	
	Cenário 1	Cenário 2*	Cenário 1	Cenário 2*
Nitrogênio – N	30	–	80	90
Fósforo – P_2O_5	120	50	25	–
Potássio – K_2O	120	80	120	–

*Áreas com aplicação de torta de filtro e vinhaça (30%).

Tabela 11 – Energia nos fertilizantes – situação atual

	Nutriente	Taxa média anual de aplicação kg/ha.ano	Energia kcal/kg	Energia/ha Mcal/ha.ano	Energia/TC Mcal/TC	Total Mcal/TC
Convencional	N	58,3	14.700	857,50	12,48	15,9
	P ₂ O ₂	36,7	2.300	84,33	1,23	
	K ₂ O	100,0	1.600	150,00	2,18	
Com vinhaça e torta (30%, Cenário 2)	N	60,0	14.700	882,00	12,84	13,4
	P ₂ O ₂	8,3	2.300	19,17	0,28	
	K ₂ O	13,3	1.600	21,33	0,31	

A5: Calcário, herbicidas e inseticidas

Calcário

Taxa de aplicação de 2.200 kg/ha em ciclos de seis anos; custo energético do calcário na lavoura 313,4 kcal/kg⁵.

Resultado:

$$E_c = 1.706 \text{ kcal/TC}$$

Herbicidas

Como valor de referência, para a situação atual, manteve-se os dados do estudo realizado em 1996, por falta de informações do custo energético (kcal/kg) dos herbicidas específicos (ver Anexo 3, Nota 3).

Resultado:

$$E_h = 2.690 \text{ kcal/TC}$$

Inseticidas

Na cultura da cana-de-açúcar, os inseticidas são utilizados na racionalização do controle de pragas de solo e formigas cortadeiras. Foi mantido o mesmo custo energético dos anos anteriores para a manutenção desse controle (190 kcal/TC).

A6: Mudas

O consumo médio é de 12 t de mudas por hectare a cada ciclo de 6 anos (ou seja, 0,0299 TC/TC). Admitindo que os procedimentos da produção de mudas são equivalentes aos da lavoura, incrementou-se em 3,0% o consumo energético global para representar o equivalente a mudas. Na situação atual:

$$\text{Cenário 1: } 1.404 \text{ kcal/TC } (= 3,0\% \times 46.804 \text{ kcal/TC})$$

$$\text{Cenário 2: } 1.336 \text{ kcal/TC } (= 3,0\% \times 44.525 \text{ kcal/TC})$$

A7: Máquinas e equipamentos agrícolas

Para a situação atual, realizou-se levantamento em usina cooperada considerada típica cujos resultados são apresentados na Tabela 12¹⁰ (ver página 27).

Uma metodologia sugerida por Pimentel⁵ é utilizada para calcular o custo energético associado aos equipamentos. Basicamente, as hipóteses são:

1) Considera-se a energia incorporada do material (aço, pneus), a de fabricação e a de reparos e manutenção. A energia incorporada, no caso, é essencialmente no aço (15.000 kcal/kg) e pneus (20.500 kcal/kg). A energia de fabricação para diversos equipamentos está tabelada por peso (excluídos os pneus).

2) A energia dos reparos corresponde a 1/3 do reparo total acumulado (há valores estimados pela ASAE⁵ por classe de equipamentos).

3) A vida útil do equipamento corresponde a 82% da vida total (em função de paradas) e o custo energético é calculado, por ano, com esses valores.

Tabela 12 – Utilização de equipamentos agrícolas – situação atual

Equipamentos	Densidade média de utilização (kg/ha)
Tratores + colhedoras	41,8
Implementos	12,4
Caminhões	82,4
Total	136,6

Dessas hipóteses resulta a Tabela 13.

Tabela 13 – Energia na produção e manutenção dos equipamentos

Equipamento	Energia do material (kcal/kg)	Peso dos pneus (fração do peso total)	Energia de fabricação (kcal/kg)	Reparo total acumulado (%)	Energia dos reparos (fração energ. mat. + fabric.)
Tratores	11.814	0,179	3.294	89,1	0,297
Implementos	15.000	-	2.061	92,6	0,309
Caminhões	15.000 aço 20.500 pneus	0,06	3.494	60,7	0,202

Com os dados sobre a densidade de utilização, a vida útil estimada e a produtividade da cana-de-açúcar, obteve-se os resultados da Tabela 14 para a situação atual.

Tabela 14 – Custo energético dos equipamentos – situação atual

Equipamento	Energia do material (kcal/ha)	Energia fabricação (kcal/ha)	Energia para reparos (kcal/ha)	Energ. mat. + fabricação corrig. vida útil (kcal/ha)	Energia total (kcal/ha)	Vida útil (anos)	Custo energético (kcal/TC)
Tratores	493.825	113.043	180.240	497.632	677.872	5	1.973
Implementos	185.550	25.495	65.213	173.057	238.269	8	434
Caminhões	1.263.170	270.631	309.828	1.257.717	1.567.545	5	4.563

Resultado para a situação atual:

$$E_e = 6.970 \text{ kcal/TC}$$

A8: Mão-de-obra

Para as finalidades deste estudo, a energia correspondente à mão-de-obra não é considerada um custo energético, não tendo, portanto, sido incluída nos cálculos. No balanço referente a 1984¹, o valor foi estimado em 1.880 kcal/TC. É certamente inferior hoje devido à expansão da prática da colheita mecanizada.

Anexo 2 – Uso de energia na produção industrial de etanol

Introdução

Este trabalho é uma atualização da avaliação dos parâmetros da área industrial feita em 1995 para as usinas associadas à Copersucar. Valores atualizados para as taxas médias de conversão na indústria foram selecionados da Referência 11 – Safra 2001/2002. Convém salientar que esses valores não diferem muito das médias das safras 1998/1999 a 2002/2003.

Açúcares redutores (AR)	0,545%
Eficiência de extração	96,2%
Eficiência de tratamento do caldo	99,2%
Perda de açúcar na lavagem de cana	0,61%
Eficiência de fermentação	91,1%
Eficiência da destilação	99,6%

Balanco energético do setor industrial

A situação atual e a avaliação do setor foram analisadas utilizando valores de consumo e eficiências médias para as usinas da Copersucar. Esses valores são importantes para determinar o ponto de equilíbrio do sistema de co-geração simples empregado e verificar as sobras e deficiências de energia.

Consumos específicos por tonelada de cana-de-açúcar não mudaram significativamente nos últimos anos na parte convencional da usina. Algumas mudanças maiores devido a novos processos (uso do ciclo-hexano na desidratação) foram consideradas. Não foram incluídos os efeitos esperados de maiores eficiências energéticas com o uso de novas tecnologias (por exemplo, com a introdução dos sistemas BIG-GT).

Eficiência industrial de conversão

Com base em valores de pol % cana-de-açúcar = 14,53%⁸ e os dados de eficiências e AR listados acima¹¹, temos os seguintes resultados:

Cenário 1: 88,7 l/TC (álcool anidro)

Cenário 2: 91,8 l/TC (álcool anidro)

Esses valores foram determinados com base nos dados disponíveis no CMI¹¹ da Copersucar, porém é razoável estendê-los para as usinas do Estado de São Paulo, ou mesmo do Centro-Sul. Todavia, por conservadorismo, o valor de 86 l anidro/TC (Cenário 1) será utilizado na execução dos balanços de energia e CO₂ como representativo do Brasil. Esse valor foi estimado por especialistas do setor que recomendam valores de 88 l anidro/TC para o Centro-Sul e 75 l anidro/TC para o Nordeste; com isso, a média ponderada para o Brasil seria de 86 l anidro/TC (85% da produção de álcool no Centro-Sul e 15% no Nordeste). Para o Cenário 2, será mantido o valor de 91,8 l anidro/TC.

Assim, os valores utilizados nos balanços de energia e CO₂ são:

Cenário 1: 86,0 l/TC (álcool anidro)

Cenário 2: 91,8 l/TC (álcool anidro)

Utilização de energia elétrica

As usinas aumentaram a produção interna de energia elétrica na safra 2001/02¹¹ (geração média: 16,83 kWh/TC; máxima, 29,13 kWh/TC). Com isso, o excedente de bagaço foi reduzido (média, 5,8%; máximo, 17%). Há usinas com grandes excedentes e com total auto-suficiência em energia elétrica.

O consumo médio de energia elétrica foi de 12,90 kWh/TC e o mínimo, 9,64 kWh/TC.

A energia adquirida (média) foi de 0,26 kWh/TC, indicando auto-suficiência de 98%. Por outro lado, a venda média de energia elétrica foi de 5,86 kWh/TC (máxima: 16,98 kWh/TC)¹¹.

Portanto, a hipótese de que o conjunto das usinas em média não adquiria nem exportava energia elétrica deixou de ser rigorosamente válida: de fato, há um aumento na exportação de energia (embora ainda pouco importante em relação ao potencial).

Há dois modos de estimar, para fins de avaliação de emissões, a exportação de energia elétrica (ainda incipiente) das usinas: ou consideramos essa exportação pequena e computamos o seu valor como mitigador de emissões, e consideramos o excedente de bagaço real resultante, ou consideramos apenas o bagaço excedente (conservadoramente). Como os dados de excedentes referem-se à produção conjunta de açúcar e etanol (não seria realista separar, hoje), a opção mais segura foi a conservadora, mas adotando um valor médio um pouco maior (na produção de etanol, os excedentes de bagaço são maiores do que na de açúcar).

Os valores usados para excedentes, portanto, são de zero para energia elétrica e de 8% (média) e 15% (máximos) para bagaço (*ver comentários no item seguinte*).

Energia utilizada no preparo e na moagem da cana-de-açúcar

Uma estimativa do consumo pode ser feita a partir da potência instalada e de algumas observações sobre as condições de moagem em algumas usinas. As usinas maiores possuem, em média, menor potência instalada específica (22,1 CV/TC para usinas com moagem superior a 300 toneladas de cana-de-açúcar por hora – TCH). Como, em geral, elas também possuem um preparo superior, é de se esperar que a potência real utilizada esteja bem próxima da instalada. Embora valores mínimos de 17 CV/TCH (potência instalada) tenham sido verificados, a análise do conjunto mostrou que um valor médio de 20 CV/TCH é uma boa estimativa da potência realmente utilizada em usinas com bom preparo e boa moagem. A relação entre potência na moagem e potência no preparo é de, aproximadamente, 1,5.

Consumo de energia nos processos: açúcar e álcool

É o setor mais difícil de analisar para “valores médios” pela variação da relação açúcar/álcool e diversidade de procedimentos na produção de álcool, assim como pelas diferenças no nível de conservação de energia. Técnicas para a redução do consumo de energia na produção de açúcar têm sido estabelecidas e utilizadas há muitos anos. Atualmente, no Brasil, a produção simultânea de álcool simplifica muito o problema, não sendo necessário esgotar o mel.

O potencial de produção de excedentes de bagaço (ou energia elétrica) tem sido analisado a partir desses números, levando a resultados muito expressivos. No entanto, para a finalidade deste trabalho, consideramos apenas dois cenários, o primeiro com valores médios atuais e o segundo com os melhores valores obtidos hoje.

Para as usinas de açúcar e álcool consideradas, os valores, hoje, são:

- Excesso de bagaço médio de 5%, atingindo 15% nos melhores casos;
- Compra de energia elétrica: zero, em média, sendo 12,90 kWh/TC o valor médio do consumo. Várias usinas são auto-suficientes.

Continua sendo razoável assumir que, na produção apenas de etanol, os excedentes de bagaço são maiores, aproximadamente 8%, e, nos melhores casos, 15%. Admitindo somente produção de etanol, serão adotados esses dados como referência.

O bagaço tem 50% de umidade e a cana-de-açúcar tem, em média, 13,5% de fibra. Com isso, temos em torno de 280 kg de bagaço por tonelada de cana-de-açúcar, com PCI = 1.800 kcal/kg, o que resulta nos valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Energia do bagaço excedente a partir da produção de etanol

Cenário 1:		
Bagaço excedente	8%	40.300 kcal/TC
Energia elétrica adquirida	0	0
Cenário 2:		
Bagaço excedente	15%	75.600 kcal/TC
Energia elétrica adquirida	0	0

A9: Insumos do setor industrial

Os principais produtos químicos e lubrificantes utilizados nos processos de produção industrial são listados abaixo com os valores médios de consumo e a energia associada Tabela 16 (*ver página 30*). Os valores para a safra 2002/2003 refletem as médias dos últimos cinco anos¹¹.

A10: Edificações, equipamentos e instalações do setor industrial

A avaliação do uso de energia na construção e montagem de uma usina de álcool pode ser feita de modo mais superficial, para os fins deste estudo, porque não representa uma parcela significativa dos fluxos de energia envolvidos na produção. Essa energia é usada na edificação de prédios, nas áreas de serviço e na produção e montagem dos equipamentos industriais.

Tabela 16 – Energia nos insumos do setor industrial

	Consumo	Energia (kcal/TC)
Ácido sulfúrico	9,05 g/l	740
Ciclo-hexano	0,60 kg/m anidro	130
Soda em escamas (total)	Vários setores	180
Lubrificantes	13,37 g/TC	170
Cal	930 g/TC	300
Total	–	1.520

Para a avaliação, consideramos uma destilaria com produção de 12 mil l/dia de álcool, trabalhando 180 dias por ano.

A energia nas edificações e áreas de serviço é mostrada na Tabela 17⁵.

Tabela 17 – Energia nas edificações e áreas de serviço

	Área (m)	Energia usada (kcal/m) (a)	Energia total (kcal)
Prédios industriais	5.000	$1,7 \times 10^6$	$13,50 \times 10^9$
Escritórios	300	$4,5 \times 10^6$	$1,35 \times 10^9$
Oficina, laboratório	1.500	$1,7 \times 10^6$	$2,55 \times 10^9$
Tancagem	4.000	$0,5 \times 10^6$	$2,00 \times 10^9$
Total			$19,40 \times 10^9$

Para os equipamentos industriais, a variação entre usinas é muito grande; vamos novamente tomar um caso típico como base, na Tabela 18.

Tabela 18 – Energia na fabricação dos equipamentos

	Peso (t)	Energia total (kcal)	Observação
Esteira de cana (30 m)	45	$0,75 \times 10^9$	(c)
Esteira de bagaço (200 m)	180	$3,9 \times 10^9$	(c)
Mesa de lavagem e acessório	42	$0,70 \times 10^9$	(c)
Moenda 30"x54", 5 ternos	220	$6,16 \times 10^9$	(d)
Turbinas, turbogerador, redutores	50	$0,9 \times 10^9$	
Caldeiras	310	$4,34 \times 10^9$	(e)
Destilaria:			
– Inox	76	$1,67 \times 10^9$	(f)
– Aço carbono	400	$6,64 \times 10^9$	(g)
Total		$24,16 \times 10^9$	

Notamos que para os equipamentos há duas parcelas do custo energético a considerar: a energia necessária para a produção do material e a energia utilizada na fabricação do equipamento. Das Tabelas 15 e 16, o total de energia na implantação do setor industrial é da ordem de 43×10^9 kcal. Esse valor não é mínimo; da análise feita, nota-se que equipamentos importantes (moendas e destilaria) estão sobredimensionados para a produção de 120 mil l/dia de álcool; em média, produzirão 180 mil l/dia.

Atribuindo a essas edificações e aos equipamentos uma vida útil de:

Edificações: 50 anos

Máquinas e equipamentos pesados (moenda, caldeiras): 25 anos

Outros equipamentos (leves): 10 anos

E, considerando um custo de manutenção (energético) equivalente ao custo real, de 4% ao ano, temos os resultados na Tabela 19.

Tabela 19 – Energia correspondente a equipamentos e instalações industriais

	En. total 10 ⁹ kcal	Vida útil (anos)	En./ano 10 ⁹ kcal	En. /ano (manut.) 10 ⁹ kcal	En. total 10 ⁹ kcal/ano	kcal/(TC/ano) Cenário 1	Cenário 2
Edificações	17,40	50	0,348	0,696	1,044	2.860	2.221
Equipamentos pesados	15,85	25	0,634	0,634	1,268	3.474	2.698
Equipamentos leves	10,31	10	1,031	0,412	1,443	3.953	3.070
Total					3,755	10.290	7.989

Verificando as condições de operação de várias destilarias hoje, encontramos, como “melhor caso”, do ponto de vista energético, unidades onde o mesmo equipamento industrial está sendo utilizado (com modificações pequenas) para produzir 240 mil l/dia de álcool. Adotando esses valores para o Cenário 2, temos:

Para 180 mil l/dia, a moagem seria de 365 mil TC (Cenário 1); para 240 mil l/dia, teríamos 470 mil TC (Cenário 2).

Cenário 1: 10.290 kcal/TC

Cenário 2: 7.989 kcal/TC

Observações:

a) Dados específicos conforme Hannon¹².

b) A energia necessária para a produção de aço bruto varia conforme o processo. Um resumo de dados coligidos de várias fontes¹³ (P.F. Chapman, *The energy cost of materials*, Energy Policy, março, 1975) indica uma variação de 9.000 kcal/kg até 14.300 kcal/kg, para seis estudos independentes realizados na década de 1970. Utilizamos 9.030 kcal/kg (valor do Anuário Estatístico da ONU, 1972¹⁴). Valores para o produto acabado (incluindo energia na fabricação do equipamento) podem ser estimados a partir de dados disponíveis (Galliland, A.; Science, setembro, 1975).

c) Essencialmente aço estrutural.

d) A capacidade dessa moenda é maior do que a necessidade da fábrica (caso comum). Consideramos como aço forjado, para avaliação do consumo.

e) Estimado pelo valor de “tratores e combinados”. Poderia ser uma caldeira de 65 t vapor/hora ou duas de 45 t vapor/hora; o peso foi tomado de equipamento convencional.

f) Colunas A,B,C,P; condensadores; trocador K.

g) Destilaria convencional com caixa de vinho, água e condensadores a 25 m; dornas, cubas, tubulões, estrutura total, serpentinas (aço carbono), com capacidade nominal para 120 mil l/24 h (álcool anidro); podendo atingir 240 mil l/dia.

Tabela 20 – Consumos para diversos equipamentos e materiais

	Consumo de energia (kcal/kg)	Comentário
Aço forjado	28.000	Produto acabado
Aço estrutural	16.600	Produto acabado
Turbinas geradores	9.500	Só fabricação
Tratores	14.350	Produto acabado
Combinadas	13.160	Produto acabado
Aço inox (tubos, vasos)	16.200 a 22.000	Produto acabado

Anexo 3 – Notas e dados complementares

Nota 1: Emissões de CO₂ no ciclo de vida dos combustíveis fósseis usados (ou substituídos) pelos produtos da cana-de-açúcar (etanol e bagaço)

A avaliação deve incluir as emissões diretas (por exemplo, emissões de CO₂ por litro de diesel usado em operações agrícolas) e indiretas (emissões na extração do petróleo, no seu transporte para a refinaria, no refino, no transporte para o consumidor, na evaporação). Para combustíveis derivados de petróleo, as emissões indiretas em geral estão entre 10% e 20% da emissão total.

Há variações para esses valores de emissões indiretas, em razão de alguns fatores: diferenças entre regiões do mundo (distâncias de transporte) e devidas aos processos e ao perfil de refino e à alocação entre diesel-gasolina e óleo combustível; mas é razoável (em função da magnitude relativa das perdas) simplificar e assumir que as emissões totais são igualmente distribuídas entre os derivados, com relação ao seu PCI, na falta de maior detalhamento.

Um exemplo específico para óleo diesel¹⁶ (Alemanha, 1992 G.A. Rheinhard *Energie und CO₂ Bilanzierung Nachwachsender Rohstoffe*, Vieweg, 1992) é o seguinte:

Emissões indiretas	kg CO ₂ /kg diesel
Exploração e transporte de petróleo	0,06
Refino	0,16 – 0,26
Transporte para o consumidor	0,02
Evaporação	0,25 – 0,35
Emissões diretas	3,15
Emissão total	3,40 – 3,49

Portanto, nesse caso, as emissões indiretas correspondem a 9% das diretas.

A referência "clássica" na década de 80⁵ indica uma relação de 81% (igual para gasolina, óleo combustível ou diesel) entre a energia direta do combustível e a energia total (direta + indireta, que inclui extração do petróleo, transporte, refino e transporte do combustível).

	Direta	Indireta	Total
Gasolina:	8.179 kcal/l	+ 1.930 kcal/l	= 10.109 kcal/l
Diesel, óleo:	9.235 kcal/l	+ 2.179 kcal/l	= 11.414 kcal/l

Para o Brasil, considerações importantes são a natureza da extração (grande parte em águas profundas), o tipo de óleo (muito óleo pesado), o que resulta em maior dispêndio de energia para o refino da gasolina.

Para este estudo, vamos manter a relação de 81% e, com base nos valores de poder calorífico e densidade do BEN¹⁷ e no conteúdo de carbono⁷, temos os valores apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Emissões de combustíveis fósseis

	Densidade kg/l	PCI MJ/kg	Carbono direto IPCC – 2001 kg C/GJ	Emissões diretas kg C/t	Emissões totais kg C/m
Gasolina	0,742	44,8	18,9	846	776
Diesel	0,852	42,7	20,2	862	908
Óleo combustível	1,013	40,19	21,1	848	1.061

Nota 2: Formas de energia utilizadas na produção de insumos agrícolas e industriais, e “embutidas” nos equipamentos, nos prédios e nas instalações

Os usos de energia “embutidos” na fabricação de equipamentos (agrícolas e industriais) e em prédios/instalações são, como previsto, pequenos em relação aos fluxos de energia nos sistemas voltados para a produção de energia. São normalmente calculados (as estimativas podem ser simplificadas, em função da pequena importância relativa) a partir do peso e do tipo do material para equipamentos (aço, ferro-liga, alumínio); em alguns casos, com “especificidades” definidas, como para tratores e caminhões. Para prédios e instalações, a estimativa é feita a partir da área coberta e do tipo de construção (galpão, escritório).

As tabelas usadas trazem o valor total da energia (kcal/kg material, por exemplo); neste valor estão os usos de energia térmica diretamente (calor, combustível no transporte) e o equivalente térmico da energia elétrica (em geral, convertido pelo fator de conversão das termoelétricas locais). Dessa forma, as emissões equivalentes de CO₂ são estimadas a partir do combustível (óleo combustível, gás natural, carvão mineral), incluindo a energia elétrica.

Se houver interesse em conhecer separadamente a parcela de energia elétrica, é preciso considerar a fração de energia elétrica no consumo total para os setores envolvidos no Brasil. Para a estimativa de emissões, no caso do Brasil seria adequado separar a energia elétrica hoje, porque, se adquirida, será mais de 90% de origem hídrica (com emissões quase nulas de GEE). Devemos lembrar, ainda, que muitos dos setores em questão, de materiais como ferro e aço e ferro-liga, usam energia elétrica autogerada, de origem térmica, em parte renovável. De qualquer modo, os valores são pequenos e não alteram o balanço.

Para o Brasil, com dados do Balanço Energético Nacional – 2002¹⁷ e com a energia elétrica no seu equivalente térmico (1 kWh = 3.132 kcal, usinas a óleo combustível brasileiras), temos:

– **Setor de mineração/peletização:**

Energia elétrica: 60%; térmica: 40% (óleo combustível, carvão metalúrgico, GN e diesel).

– **Setor de gusa/aço:**

Energia elétrica: 25%; térmica: 75% (carvão vegetal, coque, carvão mineral, carvão metalúrgico e outros).
Energia térmica “renovável”: cerca de 25%

– **Setor de ferro-ligas:**

Energia elétrica: 75%; térmica: 25% (carvão vegetal, lenha e outros)
Energia térmica “renovável”: cerca de 85%

– **Setor de cimento:**

Energia elétrica: 31%; térmica: 69% (óleo combustível, carvão, diesel e outros)
Energia térmica “renovável”: cerca de 5%

– **Setor de cerâmica:**

Energia elétrica: 23%; térmica: 67% (lenha, GLP e óleo combustível)
Energia térmica “renovável”: cerca de 60%

Aproximadamente, podemos considerar (vendo também a participação relativa dos setores):

Prédios/construções:

Energia elétrica: 30%; térmica: 70%

Máquinas/equipamentos:

Energia elétrica: 30%; térmica: 70%

Lembrando que usamos os “equivalentes térmicos” da energia elétrica (conversão: 0,29) e que, no caso de minerais, ferro e aço há muita co-geração envolvida.

Essa divisão é somente indicativa. Por segurança, no balanço de emissões foi considerado o total de energia – térmica + elétrica convertida – e considerou-se toda ela como fóssil (ignorando a parcela importante de lenha e carvão vegetal e a hidroeletricidade).

Para os insumos químicos (agrícolas e industriais), também há predominância da energia térmica. Por exemplo, para amônia anidra, a parcela de eletricidade é cerca de 1% da energia; para uréia, 6%⁵.

No caso do Brasil, onde a eletricidade é em mais de 90% de origem hídrica (com emissões de CO₂ quase nulas), considerar todo o insumo energético como sendo de origem térmica (e fóssil) é uma hipótese conservadora, pois superestima as emissões, mas será adotada na falta de dados locais mais precisos e porque a dimensão desses fluxos de energia é pequena.

Nota 3: Energia na produção de herbicidas e pesticidas

Há dificuldade em estabelecer valores nesse item, porque os produtos mudam com certa frequência e nem sempre se tem dados do consumo energético no seu preparo. Essa área no Brasil tem evoluído para o uso de controles biológicos (por exemplo, para a broca e a cigarrinha) e para uma redução sensível no uso de insumos.

Dados básicos para herbicidas e pesticidas usados na lavoura de cana-de-açúcar na década de 80 indicam⁶: herbicidas, média de 99.910 kcal/kg; inseticidas, média de 86.000 kcal/kg.

Com esses dados e com os consumos da década de 90, foram estimados os valores. São fluxos muito pequenos em comparação com os demais.

Nota 4: Emissões de metano na queima da palha da cana-de-açúcar antes da colheita

Para emissões de metano na queima de cana-de-açúcar há um único estudo completo, realizado com metodologia adequada, em túnel de vento, em 1994⁶. O IPCC⁷ recomenda usar valores “gerais” para as emissões da queima de resíduos agrícolas quando não houver dados específicos; esses valores são mais elevados do que os medidos para cana-de-açúcar, conforme Jenkins⁶. São usados os valores de GWP-100 (equivalência do gás com o CO₂, em função da sua reatividade) de 2001⁷.

A Tabela 22 mostra as diferenças e os resultados.

Tabela 22 – Emissões de metano na queima do canavial

	Coef. emissão, kg CH ₄ /TC	Palha, t palha/TC (a)	Emissão, kg CH ₄ /TC	GWP	kg CO ₂ eq./TC
IPCC ⁷	2,83	0,101	0,286	23	6,6
Jenkins ⁶	0,41	0,101	0,041	23	0,94

(a) 140 kg (MS) de resíduos/TC, com 82,4 TC/ha; queima de 90% (incompleta), e cerca de 80% de área queimada.

Para manter uma posição conservadora, vamos utilizar os coeficientes do IPCC, levando ao valor de 6,6 kg CO₂eq./TC.

As emissões de N₂O na queima da palha da cana-de-açúcar podem ser estimadas usando-se os índices indicados pelo IPCC⁷ para a queima de resíduos agrícolas em geral:

Teor de carbono no resíduo:

0,50 kg C/kg resíduo (base seca)

Teor de nitrogênio no resíduo:

N/C = 0,010 – 0,020

Coefficiente de emissão de N₂O:

0,007 kg N/kg N no resíduo

Assim, considerando-se que a relação t palha/TC é de 0,101 e assumindo N/C = 0,015, resulta:

Conteúdo de carbono na palha = 0,50 kg C/kg palha x 0,101 kg palha/TC = 50 kg C/TC

Conteúdo de nitrogênio na palha = 0,015 x 50 = 0,75 kg N/TC

Emissões de N₂O = 0,75 kg N (palha)/TC x 0,007 kg N/kg N (palha) = 0,00525 kg N/TC = 0,00825 kg N₂O/TC

Utilizando o GWP = 296 (IPCC), obtém-se:

Emissões de N₂O = 2,4 kg CO₂eq./TC

As emissões totais de GEE devido à queima da palha da cana equivalem, portanto, a 9,0 kg CO₂eq./TC.

Nota 5: Liberação de N₂O do solo (adubação nitrogenada)

Embora haja poucos estudos disponíveis sobre emissões de N₂O do solo, podemos avaliar seu valor para a cultura da cana-de-açúcar utilizando algumas hipóteses¹⁸:

1. Emissões de N₂O dependem da quantidade de fertilizante nitrogenado utilizada, da sua forma de aplicação (NO₃ ou NH₄) e das condições do solo.

2. As emissões atingem (em peso: N/N) cerca de 0,5% a 1,5% do fertilizante aplicado; os valores mais altos são para o tipo NH_4 .

Nas condições do Centro-Sul do Brasil, cerca de 28 kg N/ha são usados no plantio da cana-de-açúcar e 87 kg N/ha para cada soqueira, resultando em 75 kg N/(ha.ano) para o ciclo; a maior parte do fertilizante é do tipo NH_4 .

O resultado é a emissão de 1,76 kg N_2O /ha.ano; com um efeito estufa potencialmente 296 vezes maior do que o do CO_2 . Isso corresponde a 521 kg $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{ha.ano}$, ou 6,3 kg CO_2/TC .

Nota 6: Emissão de CH_4 nos motores automotivos operando com etanol, em comparação com os motores a gasolina

De 1980 até 1996, os limites legais de emissões para motores automotivos mudaram significativamente, em duas fases (1986 e 1992)¹⁹. As análises das médias entre 1986 e 1992 mostram que as emissões de monóxido de carbono (CO) foram sempre menores nos motores a etanol do que nos motores a gasool (mistura gasolina-etanol). Nesse mesmo período, as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) foram equivalentes e as emissões de compostos orgânicos, expressos como hidro-carbonetos (HC)^x, foram também inferiores ou equivalentes. Com base na menor emissão de CO pode-se admitir que o uso do etanol é benéfico em termos de redução dos GEE, visto que o CO é um gás que tem efeito indireto na geração de GEE, pois pode sofrer oxidação para CO_2 e, também, participar na formação do ozônio troposférico – O_3 –, que faz parte dos GEE. No que se refere aos HC e NO_x , a combinação desses poluentes resulta na formação do O_3 , entretanto, não há estudos consistentes realizados no Brasil que permitam concluir que o uso de etanol tenha tido efeito benéfico na redução do O_3 , apesar de haver indicações na literatura que permitem considerar essa possibilidade²⁰. Um fato que reforça essa linha de pensamento é que, nos EUA, o etanol é um dos “oxigenantes” utilizados na preparação de gasolinas “reformuladas”, que tem como objetivos principais a redução na emissão de substâncias tóxicas e a formação de O_3 . Apesar das indicações mencionadas, como não se dispõe de informações confiáveis que possibilitem avaliar os benefícios de CO, HC e NO_x na redução de GEE, esse aspecto positivo não será levado em conta no presente trabalho.

Um aspecto que merece atenção é a caracterização dos HC formados no processo de combustão, especialmente quanto à presença do CH_4 . Sabe-se que a relação de massas CO_2/CH_4 para motores de combustão interna é, tipicamente, 4.700 para gasolina e diesel e se situa em torno de 3.900 para metanol e etanol^{21 e 23}, o que permite inferir que a importância da emissão de metano é, em geral, muito pequena, mesmo se considerarmos que o potencial de intensificação do efeito estufa do CH_4 é 23 vezes maior do que o do CO_2 .

Os dados da Cetesb²² mostram que, com as diferentes tecnologias coexistindo em 1993, a relação de etanol/HC nos motores a álcool estava na faixa entre 0,70 e 0,85, e os HC não etanol eram, tipicamente, 0,6 g/km. Admitindo que 30% dos HC fossem metano, o resultado seria 15 kg $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ de etanol. Aplicando o mesmo raciocínio em relação a motores a gasool, a emissão seria ainda menor, provavelmente inferior a 3,75 kg $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{m}^3$ de etanol (admitindo um teor de 25% de etanol na gasolina). Esse quadro representa menos do que 1% das emissões evitadas de $\text{CO}_2\text{eq.}$ e pode ser considerado desprezível.

É muito difícil avaliar a diferença entre emissões de metano nos motores a etanol e gasolina no Brasil porque não há realmente motores a gasolina: há motores a gasool, com 20% a 25% de etanol na mistura.

Para a tecnologia atual (gerenciamento eletrônico do motor, injeção multiponto, conversor catalítico 3 vias), que passou a ser adotada em grande escala em motores a etanol e gasool a partir de 1997, com a introdução de novos limites de emissão, tem-se que o nível de emissões de metano é de, aproximadamente, 0,05 g/km²³; se esse valor for atingido, mesmo nos motores a etanol, a emissão absoluta será inferior a 0,9 kg $\text{CO}_2\text{eq.}/\text{TC}$, sensivelmente menor do que a resultante da queima da cana-de-açúcar e muito pequena em relação às emissões totais.

Devido às razões previamente apontadas, essas emissões não serão consideradas aqui.

Nota 7: Uso do bagaço excedente substituindo óleo combustível em outras indústrias

São produzidos 280 kg bagaço/TC, com 50% de umidade. O PCI é de 1.800 kcal/kg, e o PCS de 2.260 kcal/kg.

Os excedentes são de 8% e 15% (cenários 1 e 2, respectivamente), com isso, a energia excedente é de 40.300 e 75.600 kcal/TC, respectivamente, nos cenários 1 e 2 (ver Anexo 2).

Para estimar as emissões evitadas quando esse excedente substitui óleo combustível, adotamos as seguintes condições operacionais para os dois sistemas:

Bagaço: caldeiras com eficiência média de 78,7% (PCI); perdas adicionais de 10% do combustível em acondicionamento, partidas e paradas.

Óleo combustível: caldeiras com eficiência de 92% (PCI); o PCI do óleo é de 40,19 MJ/kg.

Nessas condições, os excedentes de bagaço de 8% e 15% correspondem, em termos de energia final (uso), a 3,2 kg óleo combustível/TC substituída e 6,1 kg óleo combustível/TC substituída.

As emissões totais (incluindo indiretas) relativas a essas quantidades de óleo (isto é, as emissões evitadas) são de 12,5 kg CO₂eq./TC e 23,3 kg CO₂eq./TC, para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Nota 8: Uso do etanol substituindo gasolina em motores E-100 (etanol hidratado) e em motores com mistura gasolina-etanol (etanol anidro)

Com a eficiência média atual nas usinas temos:

Cenário 1: 86,0 l etanol anidro/TC

Cenário 2: 91,8 l etanol anidro/TC

A produção de hidratado é cerca de 3% maior para a mesma matéria-prima.

As emissões diretas de CO₂ da gasolina, calculadas a partir dos parâmetros do combustível nacional (densidade = 0,742 kg/l; PCI = 44,8 MJ/kg) e das taxas de emissão do IPCC (Anexo 3, Nota 1; 18,9 kg CO₂/GJ, PCI) são de 628 kg carbono/m³. Adicionando as emissões indiretas⁵ (Anexo 3, Nota 1), o valor total a ser considerado é de 0,77 kg carbono/l, ou 2,82 kg CO₂/l gasolina.

Embora não seja possível a comparação direta de motores a etanol, a gasool e a gasolina no Brasil, a equivalência mais aceita hoje, em função dos desempenhos relativos (veículos novos), é a seguinte:

1 litro de etanol hidratado (motor E-100) = 0,7 litros gasolina

1 litro de etanol anidro (mistura) = 1 litro de gasolina

Com essas considerações, as emissões evitadas seriam de:

2,82 kg CO₂/l etanol anidro

1,97 kg CO₂/l etanol hidratado

ou, relacionando com a produção de cana-de-açúcar:

Etanol anidro: 242,5 kg CO₂/TC ou 259 kg CO₂/TC, cenários 1 e 2, respectivamente

Etanol hidratado: 169 kg CO₂/TC ou 181 kg CO₂/TC, cenários 1 e 2, respectivamente

Referências

1. Macedo, I. C. e Nogueira, L. A.: H. *Balanço de energia na produção de cana-de-açúcar e álcool nas usinas cooperadas*. Boletim Técnico Copersucar – BTC nº 31/85, Julho 1985, 22-33.
2. Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), RLT-018 – Atividade 5.51 – Energy Balance/CO₂ Emission, Março 1998.
3. Macedo, I. C. *The sugar cane agro-industry – its contribution to reducing CO₂ emissions in Brazil, Biomass and Bioenergy*. 1992, (3), 77-80.
4. Macedo, I. C. *Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and use in Brazil (1996)*. 1998, 14 (1), 77-81.
5. Pimentel, D. *Handbook of energy utilization in agriculture*. CRC Press, 1980.
6. Jenkins, B *Atmospheric pollutant emission factor from open burning of sugar cane by wind tunnel simulation – Final Report*. University of California, Davis, 1994.
7. IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis.
8. Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), *Programa de Acompanhamento Mensal de Performance Agrícola (PAMPA) – Safra 2003/2004*.
9. Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), *Controle Mútuo Agrícola Anual – Safras 1998/1999, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002, 2002/2003*.
10. Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), *Relatório C.428.00266 – Capacidade operacional e eficiência de equipamentos*, 2002.
11. Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), *Controle Mútuo Industrial – Safras 1998/1999, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002, 2002/2003*.
12. Hannon, B. *Energy and labor in construction sector*. CAC Doc. 228, Center for Advanced Computation, University of Illinois, Urbana, 1977.
13. Chapman, P. F *The energy cost of materials*. Energy Policy, Março 1975.
14. ONU. *Anuário Estatístico da ONU*, 1972.
15. Galliland, A. *Science*. Setembro 1975.
16. Rheinhard, G. A. *Energie und CO₂ Bilanzierung Nachwachsender Rohstoffe*. Vieweg, 1992.
17. *Balanço Energético Nacional – BEN 2002* – Ministério de Minas e Energia (MME), 2002.
18. Lewandowski, I *CO₂ balance for the cultivation of miscanthus*, Biomass and Bioenergy, 1995. 8 (2), 81-90.
19. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo (Cetesb), *Relatório da Qualidade do Ar – 2002*. São Paulo, Agosto de 2003.
20. Brandberg, A. *Unregulated Emissions from Engines Fueled with Alcohols and Other Fuels*, Proceedings of the IX International Symposium on Alcohol Fuels Florence, Italy, November 12 - 15, 1991.
21. Hirai, E. Y. *Determinação de concentração de álcool nos gases de escapamentos de veículos leves*, Relatório Interno, Cetesb, São Paulo, Março 1993.
22. Branco, G.M. *Controle de poluição veicular no Brasil*, Relatório Interno, Cetesb, São Paulo, Março 1992.
23. Informação pessoal fornecida por empresas do setor automobilístico no Brasil.

Secretaria de Estado do Meio Ambiente

tel.: 55 xx 11 3030 6000
www.ambiente.sp.gov.br

Avenida Prof. Frederico Hermann Jr., 345
São Paulo 05459-900 – SP - Brasil

Expediente

Edição e revisão de textos
Thiago de Christo

Projeto gráfico e direção de arte
Carlos Papai Lobato

Impressão e Fitolito
Arizona
print>pre-media>convergência



**SECRETARIA DO
MEIO AMBIENTE**



**GOVERNO DO ESTADO DE
SÃO PAULO**
RESPEITO PELAS PESSOAS