

Balço de energia e emissões de GEE na produção do açúcar e álcool orgânicos na Usina São Francisco

Joaquim E. A. Seabra ^{a,*}, Isaias de Carvalho Macedo ^b

^a Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM/UNICAMP.

^b Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE/UNICAMP.

1. Objetivo e escopo

O objetivo deste trabalho foi levantar o inventário de carbono (emissões de gases de efeito estufa – GEE) associado à produção do açúcar e álcool orgânicos, considerando as condições de produção da Usina São Francisco (UFRA) na safra 2006/2007. Nesta avaliação foi considerada somente a produção relacionada com a cana cultivada pela usina (50% da moagem total), amostra para a qual se dispunha da maior quantidade e qualidade de informações (confiabilidade e rastreabilidade dos dados).

Por estar fortemente relacionado com a emissão de GEE, o balanço de energia envolvido no ciclo também foi avaliado para facilitar os cálculos das emissões. A avaliação foi baseada numa análise do “berço-ao-portão da fábrica”, considerando desde a agricultura da cana e produção de insumos, até a fase industrial da produção do açúcar e do álcool na usina (ver Figura 1). Como parte destes produtos é destinada ao mercado externo, para estes casos também foram consideradas as demandas de energia envolvidas no transporte até o porto de destino (EUA, UE e Japão).

Além do cômputo das emissões associadas à produção, também foram avaliadas as possíveis emissões evitadas devido ao uso dos produtos da cana: o álcool em substituição à gasolina no Brasil e o açúcar em comparação com o açúcar produzido a partir de beterraba na Europa. Ambos os produtos ainda contam com créditos de carbono advindos da comercialização da energia elétrica produzida a partir do bagaço.

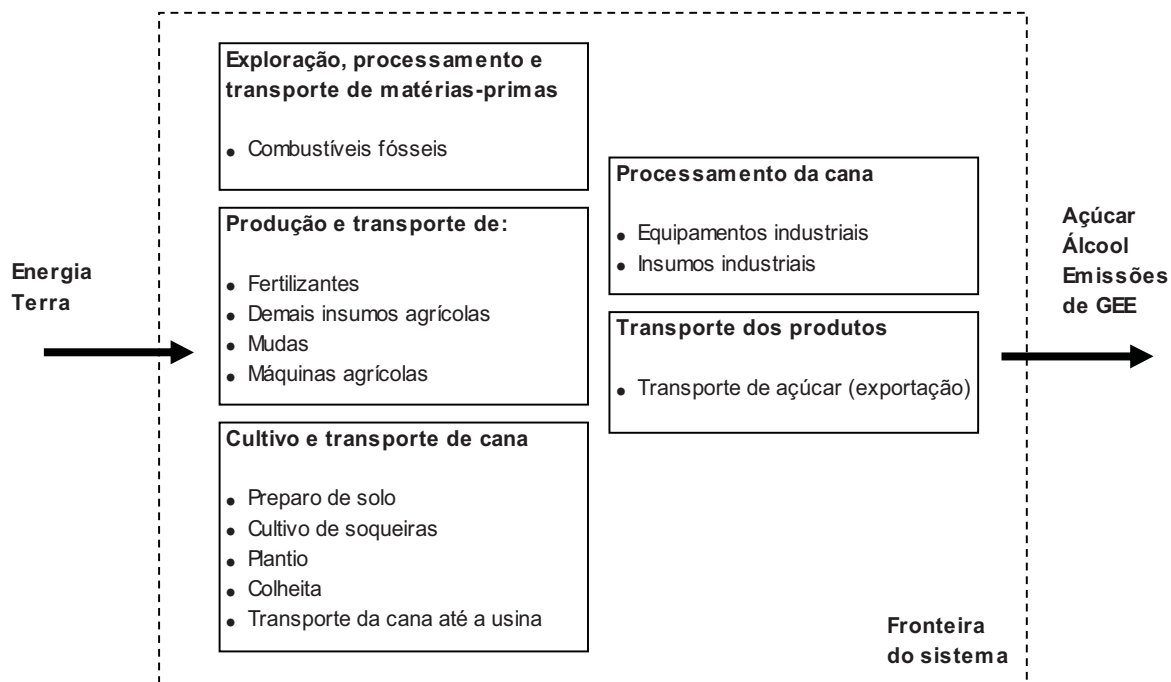


Figura 1. Fronteira do sistema considerado nesta avaliação.

2. Metodologia

2.1. Uso de energia e emissão de GEE

Nesta avaliação três níveis de fluxos de energia foram considerados nos balanços de energia e emissões de GEE:

1. O consumo direto de combustíveis e eletricidade externos;
2. A energia adicional para a produção de produtos químicos e materiais utilizados nos processos agrícolas e industriais (fertilizantes, cal, ácido sulfúrico, lubrificantes, etc.); e
3. A energia adicional necessária para a manufatura, construção e manutenção de equipamentos e edificações.

Todos os fluxos de energia foram calculados em termos da energia primária (requerimento bruto de energia), ou seja, os inputs de energia requeridos durante a extração, transporte e produção dos combustíveis (ou eletricidade) foram considerados. Os coeficientes usados para a determinação dos consumos de energia e emissões de GEE são discutidos a seguir.

Combustíveis. Como não existem dados atuais confiáveis para o consumo de energia e emissão de GEE para a produção de combustíveis derivados de petróleo no Brasil, neste estudo optou-se pelo uso de dados internacionais consolidados. As particularidades brasileiras com relação à natureza da

extração (grande parte em águas profundas) e ao tipo de óleo (muito óleo pesado) resultam num dispêndio maior de energia para a produção dos combustíveis, mas as eventuais variações com relação aos valores internacionais não seriam tais que pudessem comprometer esta análise. A Tabela 1 apresenta os valores considerados.

Tabela 1. Demanda de energia e emissões de GEE na produção de combustíveis fósseis.

Combustível	Demanda de energia ^a (MJ/MJc)	Emissão direta ^b (g C/MJc)	Emissão na produção ^c (g C/MJc)	Emissão total (g C/MJc)
Gasolina	1,14	18,9	3,41	22,3
Diesel	1,16	20,2	3,87	24,1
Óleo combustível	1,24	21,1	4,95	26,1
Gás natural	1,12	15,3	9,53	24,8
Coque de petróleo ^d	1,00	27,5	-	27,5

a. Eucar (2006).

b. IPCC (2001).

c. Eucar (2006); considerando extração, transporte e processamento.

d. Considerado como resíduo; as emissões relacionadas com a sua produção não foram consideradas.

Eletricidade. Apesar dos recentes investimentos na construção de termelétricas a gás natural, a geração de energia elétrica no Brasil ainda é essencialmente de base hídrica (> 85%). Na realidade, a geração de energia a partir de fontes fósseis contabiliza por menos de 10% da eletricidade produzida no país (BEN, 2006). Evidentemente, esse baixo consumo de combustíveis fósseis também é refletido nas emissões de GEE. De acordo com as avaliações apresentadas pelo MME para determinações da linha de base em projetos de MDL, em 2006 as emissões na geração de energia elétrica na Região Sudeste-Centro-Oeste se situaram entre 78 e 180 kg CO₂/MWh. Como referência, aqui foram considerados um fator de emissão de 130 kg CO₂/MWh e um consumo específico de energia fóssil de 2.300 MJ/MWh. Esses fatores foram utilizados somente para o cálculo das emissões associadas ao uso de energia elétrica na usina. No caso da energia embutida nos equipamentos e edificações, tendo em vista os pequenos fluxos de energia envolvidos no ciclo de vida dos produtos da cana, a parcela relacionada à energia elétrica não foi considerada.

Transporte do açúcar. Como parte do açúcar produzido pela usina é destinado ao mercado externo, aqui foram considerados os consumos de combustível relativos ao transporte do açúcar até o porto de Santos e, de lá, até os destinos finais – EUA (costa leste e oeste), UE e Japão. Até Santos foi considerado o transporte através de caminhões com um consumo específico de diesel de 0,020 L/t.km, e para o transporte marítimo adotou-se um índice de 0,20 MJ/t.km (fator de emissão de 0,08725 kg CO₂/MJ; óleo combustível pesado) (JEC, 2006).

Energia embutida nas máquinas agrícolas e equipamentos industriais. Por simplificação, nesta avaliação todos os materiais utilizados na fabricação de máquinas e equipamentos foram considerados como metalúrgicos. De acordo com o Balanço Energético Nacional (2006), o consumo específico de energia na indústria de metalúrgicos em geral foi de 27,2 MJ/t (em 2005), dos quais cerca 65% eram de origem fóssil (principalmente coque e carvão mineral). Em termos de emissões,

Kim e Worrell (2002) estimaram para o Brasil um fator de aproximadamente 1,25 t CO₂/t de material produzido, considerando um consumo específico de energia próximo ao valor de 2005. Portanto, aqui foi considerado um consumo de energia fóssil de 17,7 MJ/t e um fator de emissão de 1,25 t CO₂/t.

Já para a etapa de fabricação das máquinas e equipamentos, como o consumo de energia está relacionado essencialmente à eletricidade, aqui esta parcela não foi considerada.

Energia embutida nas edificações. O consumo de energia na construção de edificações varia de 3,0 a 5,0 GJ/m², conforme o tipo de construção. Para uma construção residencial brasileira padrão, estima-se um consumo de energia de 3,5 GJ/m², no qual se destaca principalmente a parcela relacionada com a produção do cimento (Tavares, 2005). Na indústria nacional de cimento (BEN, 2006), cerca de 60% da energia demandada é proveniente de fontes fósseis (coque de petróleo principalmente) e, por simplificação, aqui estendemos esta relação para todas as edificações. Considerando estes valores e os tipos de construção envolvidas na usina, foram propostos os valores apresentados na Tabela 2 como padrão para os cálculos. Para a avaliação das emissões foi considerado o fator de emissão do coque de petróleo, ou seja, 100,8 kg CO₂/GJ.

Tabela 2. Energia embutida e fator de emissão para as diferentes edificações da usina^a.

Edificação	Energia embutida^b (GJ/m²)	Fator de emissão (kg CO₂/GJ)
Prédios industriais	2,0	100,8
Áreas administrativas	2,4	100,8
Áreas de estocagem	1,2	100,8

^a. Baseado em Tavares (2006).

^b. Energia fóssil.

Energia requerida para a produção de fertilizantes. Como não há dados brasileiros abrangentes e suficientes sobre o consumo de energia na produção de fertilizantes, novamente a análise foi baseada em dados internacionais. Para fertilizantes, cal, herbicidas e inseticidas foram assumidos os valores de energia embutida e emissões apresentados nos modelos GREET e EBAMM, que representam os padrões verificados nos EUA (ver Tabela 3).

Tabela 3. Demanda de energia e emissões de GEE para a produção de fertilizantes/defensivos agrícolas.

Fertilizante/defensivo	Demanda de energia (MJ/kg)	Fator de emissão (kg CO₂/kg)
Nitrogênio	56,9	3,97
Fósforo	9,3	1,60
Potássio	7,0	0,71
Calcário	0,1	0,01
Herbicida	355,6	25,00
Inseticida	358,0	29,00

^a. Fonte: modelos GREET e EBAMM.

^b. Estimativa dos autores.

Energia requerida para a produção dos insumos químicos. A estimativa dos requerimentos de energia e emissões associadas na produção de insumos químicos foi baseada em informações gerais da indústria química Brasileira. Em 2005, o consumo específico de energia na indústria química no Brasil foi de 8,1 MJ/t de produto (BEN, 2006), do qual 73% foi proveniente de fontes fósseis (essencialmente gás natural e coque de petróleo). Por simplificação, este coeficiente foi atribuído a todos os químicos utilizados pela usina e com um fator de emissão de 95 kg CO₂/GJ (associado ao uso de GN e coque de petróleo).

No caso das máquinas, equipamentos e edificações, os fluxos de energia e emissões foram calculados em base anual através da diluição dos valores totais ao longo da vida útil de cada componente, e acrescidos dos fluxos relacionados às taxas de manutenção anual¹. Todos estes valores são apresentados discriminadamente na planilha eletrônica *Inventario_CO2.xls* (entregue em anexo).

Além do uso de combustíveis fósseis, a análise de emissões de GEE incluiu os seguintes itens:

- Emissões de CH₄ e N₂O derivados da queima da palha da cana durante a pré-colheita;
- Emissões de N₂O e CO₂ a partir do solo pela aplicação de fertilizantes minerais, calcário e resíduos que são retornados ao campo.

Para todos estes casos foram utilizados os coeficientes indicados pelo IPCC (2006), com os valores atuais de GWP-100. As emissões de óxido nitroso da palha da cana e do adubo verde deixados no campo, adicionadas às da torta de filtro e vinhaça (que são resíduos industriais que carregam parte do nitrogênio da cana) foram avaliadas de acordo com os valores indicados para a categoria de resíduos agrícolas que são retornados ao solo. Vale destacar, no entanto, que esses valores não representam necessariamente a realidade verificada para o caso específico da biomassa de cana. No caso da aplicação de esterco, foi utilizado o coeficiente específico indicado pelo IPCC. A Tabela 4 apresenta o resumo dos coeficientes utilizados.

¹ Os fluxos anuais de energia relacionados com as taxas de manutenção foram estimados com base nos gastos econômicos anuais de manutenção divididos pelos custos de cada equipamento. No caso dos equipamentos agrícolas, foram utilizadas as informações da própria usina, obtendo-se relações muito próximas às sugeridas por Macedo et al. (2004). Como não se dispunham de informações sobre a área industrial, aqui foi utilizado um índice de 4% como consumo anual adicional de energia relacionado a manutenções, que é o índice proposto por Macedo et al. (2004).

Tabela 4. Fatores de emissão não relacionados ao uso de combustíveis fósseis.

Fonte	Fator de emissão (kg CO ₂ /kg-fonte)
Queima da palha	
N ₂ O ^a	0,024
CH ₄ ^b	0,077
Aplicação de nitrogênio (uréia)	
N ₂ O ^c	6,163
CO ₂ ^d	1,594
Calcário dolomítico	
CO ₂ ^e	0,477
Resíduos retornados (kg CO ₂ /kg N) ^f	
N ₂ O (vinhaça)	5,698
N ₂ O (torta de filtro)	5,698
N ₂ O (fuligem)	5,698
N ₂ O (palha)	5,698
N ₂ O (adubo verde)	5,698
N ₂ O (esterco bovino)	6,628

- a. Baseado no fator de emissão indicado pelo IPCC (0,007kg N/kg N no resíduo), o qual, multiplicado pelo teor de nitrogênio da palha (0,75%), pela relação molecular (44/28) e pelo GWP (296), resulta num fator de emissão de 0,024kg CO₂/kg de palha.
- b. Baseado no fator de emissão indicado pelo IPCC (3,33 kg CH₄/t palha), que multiplicado pelo GWP resulta no fator de emissão final.
- c. 1,325% do N no fertilizante é convertido em N na forma N₂O.
- d. Fator de emissão indicado para uréia (0,2 kg C/kg uréia; 46% de N).
- e. Fator de emissão: 0,13 kg C/kg.
- f. Para o esterco, 1,425% do N é convertido em N na forma N₂O; para os demais foi considerado um índice de 1,225%. Os teores de nitrogênio de cada resíduo foram fornecidos pela própria usina.

2.2. Produção de energia e emissões evitadas

A produção total de energia renovável da usina é a soma das contribuições térmicas do etanol produzido e da eletricidade gerada. No caso do etanol esta parcela é estimada através de seu poder calorífico inferior (PCI), enquanto que para a energia elétrica foi considerada uma equivalência térmica de 5.325 MJ/MWh, baseada na metodologia para obtenção de créditos de carbono proposta pela usina (PDD, 2005).

A avaliação das emissões evitadas depende das equivalências entre o combustível renovável (etanol e energia elétrica) e o combustível fóssil substituído (inclusive em qual processo), e, evidentemente, das suas respectivas emissões no ciclo de vida. Para o etanol existem inúmeras possibilidades. Aqui foi considerado o seu uso na forma hidratada em substituição à gasolina nos carros *flex fuel* (a equivalência adotada foi de 1 litro de etanol = 0,72 litro de gasolina (Joseph Jr, 2005)). Para a energia elétrica, novamente foi considerado o valor indicado na metodologia para obtenção de créditos de carbono, ou seja, uma emissão evitada de 267,7 kg CO₂/MWh (PDD, 2005). Esse crédito obtido foi repartido entre o açúcar e o álcool de acordo com o *mix* de produção da usina.

3. Resultados

Todos os resultados parciais são apresentados em detalhe na planilha *Inventario_CO2.xls*, bem como todo o procedimento de cálculo. Aqui são apresentados somente os resultados finais com os destaques mais relevantes. As Figuras 1 e 2 apresentam os detalhes do consumo de energia fóssil e as emissões de GEE verificados na safra 2006/2007. O consumo de energia fóssil para a produção da cana na Usina São Francisco foi de aproximadamente 151 MJ/tc, com uma emissão de GEE equivalente a 34,08 kg CO₂/tc. Na etapa de processamento da cana o nível de emissões é relativamente baixo (apenas 1,11 kg CO₂/tc), graças ao uso do bagaço da cana como fonte de energia. Como resultados finais, temos os totais indicados por produto na Tabela 5.

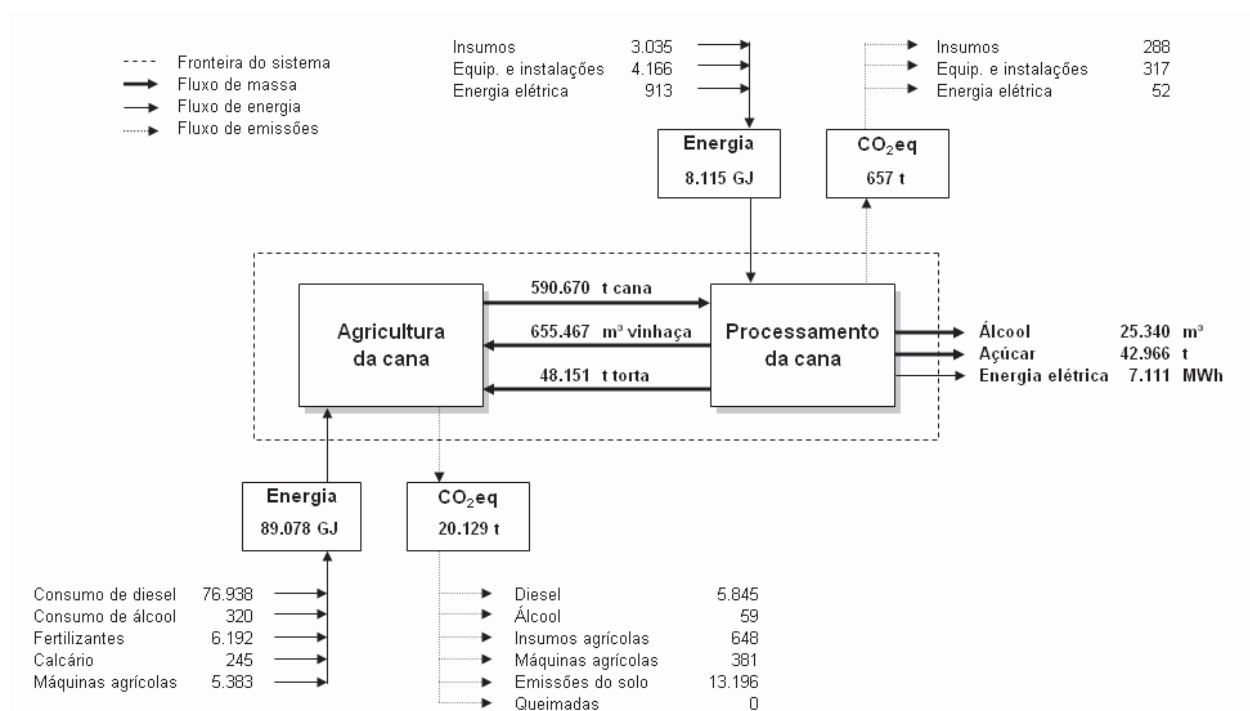


Figura 2. Consumo de energia fóssil e emissões de GEE verificados na safra 2006/2007.

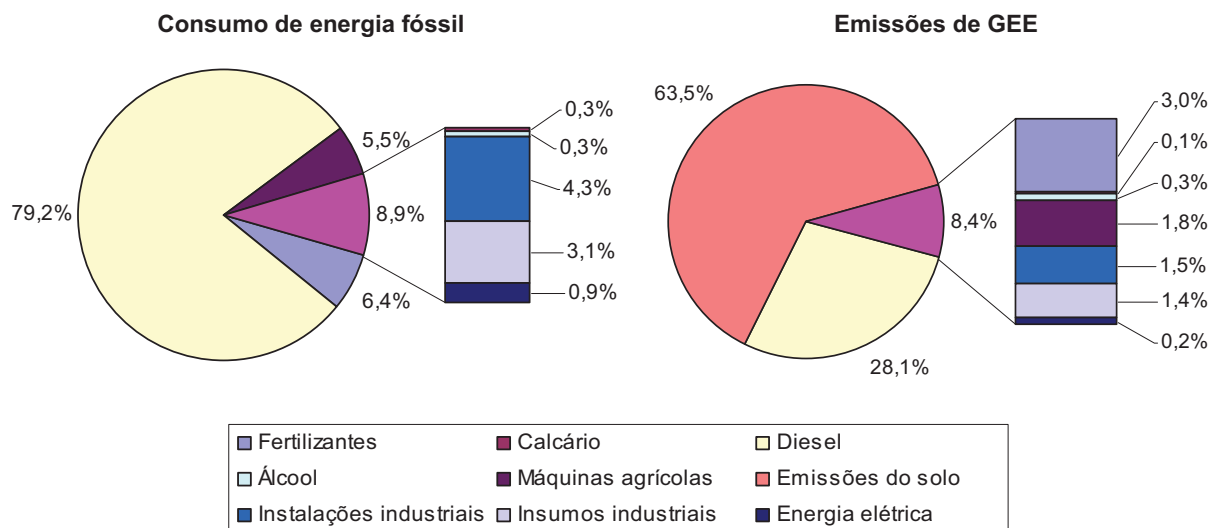


Figura 3. Composição do consumo de energia fóssil e das emissões de GEE na produção e processamento da cana.

Tabela 5. Consumo de energia fóssil e emissões de GEE na produção dos diferentes produtos da usina.

Produto	Consumo de energia fóssil (MJ/t ou m ³)	Emissões (kg CO ₂ /t ou m ³)	Emissões líquidas ^a (kg CO ₂ /t ou m ³)
Cana processada	164,5	35,19	31,97
Açúcar Brasil	1.143,4	244,54	222,14
Açúcar EUA (leste)	3.597,3	454,87	432,47
Açúcar EUA (oeste)	4.497,3	533,39	511,00
Açúcar UE	3.657,3	460,10	437,71
Açúcar Japão	5.917,3	657,29	634,89
Álcool	1.896,7	405,64	368,49

^a. Considerando as emissões evitadas através da geração de energia elétrica excedente.

Comparativamente, os valores verificados para a UFRA são consideravelmente menores dos valores médios de emissão do setor, devido essencialmente à não queima da palha da cana e à não utilização de fertilizantes nitrogenados sintéticos (mas a grande quantidade de resíduos agrícolas e industriais aplicados no solo contribuem significativamente para o aumento das emissões). Para se ter idéia de como estas práticas afetariam as emissões, se considerarmos valores usuais (prática convencional) verificados no Estado de São Paulo para aplicação de fertilizantes nitrogenados (uréia; 60 kg/ha total) e queima de cana (70% da cana total; neste caso a quantidade de palha deixada no solo é conseqüentemente diminuída), as emissões de GEE na produção de cana saltariam de 34,08 para 50,44 kg CO₂/tc.

Esse baixo nível de emissões na produção da cana acaba sendo refletido nos produtos. No caso do álcool, a emissão verificada foi de 369 kg CO₂/m³ hidratado, já considerando os créditos da energia elétrica. Na realidade, se pensarmos no uso final do etanol em substituição à gasolina, temos uma emissão líquida evitada de 1.532 kg CO₂/m³ de álcool hidratado. Um outro índice bastante favorável é a relação de energia (resultado da divisão da energia renovável produzida pela energia

fóssil consumida), que atingiu 11,6 para o caso da UFRA em 2006. Novamente, se considerarmos os valores usuais para aplicação de nitrogênio e queima de cana, as emissões para a produção do etanol atingiriam 557 kg CO₂/m³ hidratado, e a relação de energia seria de “apenas” 9,0.

Para o açúcar, a lógica é evidentemente mantida. O nível de emissão para a produção do açúcar foi de 222 kg CO₂/t, que passaria para 336 kg CO₂/t, caso fossem utilizadas as práticas convencionais.

No caso exclusivo do açúcar exportado para a Europa, as emissões totais em 2006 atingiram 438 kg CO₂/t, por conta do grande volume de emissões associado ao transporte. Ainda assim, o açúcar da cana é muito mais competitivo em termos de emissão do que o açúcar produzido a partir da beterraba na Europa, cuja emissão é estimada em aproximadamente 900 kg CO₂/t² (ver comparações na Figura 4). Isto porque, diferentemente da cana, o processamento do açúcar de beterraba exige grandes quantidades de energia fóssil (essencialmente óleo combustível), já que o resíduo da beterraba não é próprio para uso energético. Conseqüentemente, neste caso pode-se dizer que o consumo do açúcar da cana em detrimento do açúcar de beterraba poderia gerar uma economia de emissões de GEE de cerca de 462 kg CO₂/t.

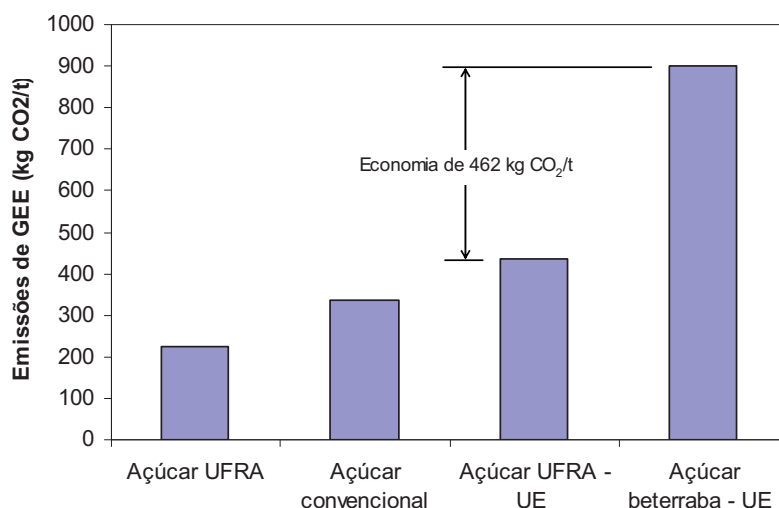


Figura 4. Emissões de GEE para os diferentes açúcares (Açúcar convencional equivale ao açúcar UFRA acrescido das emissões referentes ao uso de nitrogênio sintético e das queimadas e descontado das emissões equivalentes que seriam provenientes da palha deixada sobre o solo).

² As estimativas de uso de energia fóssil e emissões para a produção do açúcar de beterraba variam de acordo com as avaliações. Kuesters e Lammel (1999) avaliaram o consumo de energia para a produção da beterraba em função do consumo de fertilizante nitrogenado, e para a taxa de aplicação convencional (120 kg/ha) verificaram um consumo de aproximadamente 13 GJ/ha. Brentrup et al. (2001) fizeram uma análise de ciclo de vida considerando diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados e obtiveram médias em torno de 15 GJ/ha, com emissões próximas a 1.600 kg CO₂/ha, enquanto que Styles e Jones (2007) chegam a um valor próximo a 3.500 kg CO₂/ha. Dalgaard et al. (2001) ainda propuseram um modelo para a avaliação do consumo de energia fóssil na agricultura considerando até as possibilidades de cultivo convencional e orgânico; para a beterraba, o menor consumo verificado foi de cerca de 14 GJ/ha, para a cultura convencional, e de 12 GJ/ha, considerando um cultivo orgânico. Em todos os casos mencionados, porém, o transporte da beterraba até a usina não foi considerado. Börjesson (1996) estimou um consumo total de energia 27 GJ/ha, mas levando em conta um consumo de 3,1 GJ/ha referente ao transporte da beterraba. Já no caso da etapa industrial, Krajnc et al. (2007) encontrou uma emissão de 626 kg CO₂/t de açúcar produzido, considerando uma planta de produção típica na Europa.

Arbitrariamente, aqui foram adotados nas comparações os valores sugeridos por Brentrup et al. (2001), que foram adicionados do valor determinado por Börjesson para o transporte e do consumo na etapa industrial determinado por Krajnc et al. (2007). Considerando estes valores, chegamos a uma emissão final de aproximadamente 900 kg CO₂/t de açúcar e um consumo de energia de 14,2 GJ/t de açúcar.

4. Referências bibliográficas

- BEN – Balanço Energético Nacional 2006: Ano base 2005. Relatório final / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2006. 188 p.
- Brentrup, F, Küsters, Kuhlmann, H e Lammel, J. Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilizers. *European Journal of Agronomy* 14 (2001) 221-233.
- Börjesson, PII. Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 11, No. 4, pp. 305-318, 1996.
- Dalgaard, T, Halberg, N e Porter, JR. A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87 (2001) 51-65.
- EBAMM Release 1.0 – The ERG Biofuels Analysis Meta-Model. December 26, 2005.
- EUCAR, CONCAWE e JRC/IES. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Tank-to-wheels Report; Version 2b, May 2006. 88 pp.
- REET 1.6 – Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation. Argonne National Laboratory. Argonne, Illinois, USA.
- IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2006.
- IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp., 2001.
- Joseph Jr, H. The Use of Ethanol Blends as Regular Fuel for Existing Vehicular Fleets. Report for the Brazilian Ethanol Mission to Japan; UNICA – COIMEX, 2005.
- Kim, Y e Worrell, E. International comparison of CO2 emissions trends in the iron and steel industry. *Energy Policy* 2002, 30, pp. 827-838.

Krajnc, D, Mele, M e Glavič, P. Improving the economic and environmental performances of the beet sugar industry in Slovenia: increasing fuel efficiency and using by-products for ethanol. *Journal of Cleaner Production* 15 (2007) 1240-1252.

Kuesters, J e Lammel, J. Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe. *European Journal of Agronomy* 11 (1999) 35-43.

Macedo, IC (organizer). *Sugar Cane's Energy – Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability*. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: UNICA, 2005.

Macedo, IC; Leal, MRLV; da Silva, JEAR. *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil*. Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo. Abril de 2004. 19 pp + anexos.

Project Design Document Form (CDM PDD) - Version 02. Bioenergia Cogeneradora S.A. ("Bioenergia"), correspondig to the Santo Antonio Mill (USA – from the Portuguese "Usina Santo Antônio") and the São Francisco mill (USFR – from the Portuguese "Usina São Francisco"). PDD version number: 11 B. October 14, 2005.

Styles, D e Jones, MB. Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop. *Biomass and Bioenergy* (2007), doi:10.1016/j.biombioe.2007.05.003.

Tavares, SF. *Análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras*. Universidade Federal de Santa Catarina (2006).