

4 RESULTADOS

4.1 Resultados do Inventário de Ciclo de Vida da Usina visitada

A usina visitada está localizada em Pernambuco e foi estudada em Março de 2013 a fim de avaliar o ciclo de vida da usina e obter dados de produção.

A metodologia de cálculo aplicada ao inventário da usina Visitada foi apresentada em (Díaz, 2011). Analogamente ao estudo deste autor, o Anexo 2 apresenta o gráfico dinâmico que desmembra os diferentes componentes das emissões originadas pelos diferentes estágios produtivos da usina.

As referências para a análise de ciclo de vida realizada a partir deste inventário foram os trabalhos de (IPCC, 2006a) e (ABNT, 2001/2004), considerando apenas CO₂, CH₄ e N₂O como o universo de GEE, com as emissões expressas em quilogramas de CO₂ equivalente (kg CO₂eq).

Para conseguir processar todos os dados compilados em campo, o presente estudo recorreu à literatura prévia a fim de obter fatores de emissão das diversas atividades realizadas na usina. Os processos agrícolas tiveram seus fatores de emissão baseados nas recomendações do IPCC em (IPCC, 2006a). Os trabalhos de (Macedo et al, 2008) e (Boddey et al, 2008) também foram consultados para obtenção de fatores de emissão.

A usina faz uso mínimo de gasolina em alguns veículos de passeio, o que levou o presente estudo a considerar apenas o óleo diesel como combustível fóssil envolvido no processo, para qual utilizamos os dados de (Díaz, 2011) para calcular as emissões de GEE.

Uma particularidade da usina é a não realização do pousio, havendo colheita seguida imediatamente de plantio de cana anualmente ou a cada 18 meses, o que implica

em colheitas mais frequentes, e maiores emissões atreladas à estas. A usina faz sua colheita manualmente, fazendo queima prévia do canavial.

De maneira similar, plantio é realizado em duas modalidades distintas: plantação anual é realizada em terrenos planos e em terrenos com inclinação, se utiliza a cana de 18 meses. Em ambos os casos, a cana é plantada com aplicação direta de toletes sobre a terra (sem abertura de sulcos), o que dispensa o transporte de mudas, como pode ser visto na Figura 20.



Figura 20: Toletes de cana usados no plantio da Usina Visitada

Como de costume em muitas usinas do país, as cinzas e torta de filtro gerados na usina Visitada são inteiramente destinados à lavoura para serem usados como fertilizante no processo, conforme pode ser visto na Figura 21.



Figura 21: Solo em primeiro plano com coloração evidenciando a aplicação de cinzas e torta de filtro nas terras da Usina Visitada

Com base nos valores de literatura e dados primários obtidos na usina, o consumo de combustível durante a operação agrícola do processo é de 266,7l/ha.ano.

Os valores calculados para o consumo de energia fóssil na produção de etanol está na Tabela 11. Estes cálculos foram feitos considerando caminhões com capacidade de 12 toneladas de carga, consumindo, em média, 2,5km/l, e com uma distância média, segundo (Macedo et al, 2004) de 25km entre usina e produtor de insumos. Destes valores, utilizando os devidos fatores de emissão de GEE, obtêm-se as emissões totais de GEE do processo, conforme exposto na Tabela 12.

Foram aplicados 27,7kg de nitrogênio (em forma amoniacal), 3,6kg de superfosfato simples (P_2O_5), 34,7kg de cloreto de potássio e 1,5kg de cal dolomítica no período da última safra. A usina também aplica vinhaça diluída com água na lavoura

através de bombeamento direto. A vinhaça gerada na usina é direcionada a uma lagoa de vinhaça –devidamente impermeabilizada – que alimenta canais de distribuição espalhados pela lavoura. Foram bombeados 19,7l/ha na safra 2012-2013. A usina apresenta um sistema hidráulico que possibilita o transporte da vinhaça para a maior parte de suas terras, como pode ser visto na Figura 22.



Figura 22: Poço de verificação de nível do sistema de bombeamento de vinhaça

Já na etapa industrial, as emissões de GEE não são contabilizadas. Isto se deve ao fato do processo industrial queimar o bagaço de cana para gerar o vapor que realiza trabalho na usina. A origem desta energia (vapor da queima do bagaço) é não-fóssil, e os GEE emitidos no processo são neutralizados pela próxima safra, uma vez que a cana de açúcar irá absorver estes mesmos gases da atmosfera durante seu crescimento. Além do parque industrial, as outras instalações da usina também se beneficiam da queima do bagaço através do uso de geradores termoelétricos, como mostra a Figura 23.



Figura 23: Gerador termoelétrico alimentado pela queima de bagaço

Para a análise ponderada de valores encontrados durante a visita técnica, levou-se em consideração os indicadores produtivos de cana (Tabela 10) e dos produtos derivados de cana (Tabela 15).

Tabela 10: Produção e rendimento de cana da safra de 2012 da Usina Visitada

Usina Alcoolquímica	Área (ha)	Cana de açúcar		
		Toneladas	Rendimento Médio (t/ha)	t/ha.ano
Fonte: Boletim 2012	15215,50			
Cana própria		734.177,05	48,25	40,210
Cana recebida		398.110,47		
Total de cana moída		1.132.287,52		
Cana moída - destino açúcar		660.503,86	58%	
Cana moída - destino etanol		471.783,66	42%	

Tabela 11: Energia total consumida na safra 2012 da Usina Visitada

Item	Quant. Bas.	Unid. Bas./ha.ano	MJ/ha.ano
Óleo diesel	266,7	l	9.474,8
Calcário	1,5	kg	2,0
Herbicida	15,7	kg	7.091,1
Inseticida	0,002	kg	0,6
Aplicação da vinhaça	19,7	l	14,2
Nitrogênio	27,7	kg	1.497,2
Fósforo	3,6	kg	11,5
Potássio	34,7	kg	204,9
Total			18.296,2

Tabela 12: Total de GEE emitidos na safra 2012 da Usina Visitada

Item	Quant. Bas.	Unid. Bas./ha.ano	kg CO ₂ Eq./ha.ano
Óleo diesel	266,74	l	702,9
Calcário	1,5	kg	1,1
Herbicida	15,7	kg	520,4
Inseticida	0,002	kg	0,05
Aplicação da vinhaça	19,7	l	171,4
Nitrogênio	27,7	kg	16,9
Fósforo	3,6	kg	0,6
Potássio	34,7	kg	11,8
Emissões da queima			1.127,3
Total			2.552,5

Tabela 13: Produção de etanol e outros derivados da cana na safra 2012 da Usina Visitada

Total de etanol produzido (l)	55.433.726	
Etanol hidratado (l)	13.319.097	24%
Etanol anidro (l)	40.304.735	73%
Etanol neutro	1.809.894	3%
Produtividade Etanol (l/ha.ano)	4.371.889	
Outros produtos		
Açúcar (t)	52317,05	
Cachaça (l)	24947,7	
Bagaço próprio (t)	351009,13	
Bagaço comprado (t)	12737,02	
Palha (t)	3796,28	

4.2 Eficiência Energética da Usina visitada

A eficiência energética será considerada a razão entre a potencial energia gerada pelo biocombustível produzida e a energia consumida em seu processo produtivo. Os valores de eficiência energética indicam uma grande capacidade de converter a biomassa em energia, valores menores que 1 indicam um processo que desperdiça energia e valores maiores que 1 indicam que o processo tem melhor rendimento sobre a energia investida. Em (Malça e Freire, 2006) a eficiência energética é também é descrita como um indicador do quanto o combustível produzido é, de fato, renovável. Os autores citados, assim como (Macedo et al, 2008), sugerem que o valor deve ser calculado dividindo o rendimento líquido e a energia consumida, ou seja, a energia renovável gerada dividida pela energia fóssil consumida. Na Tabela 14, o autor (Diaz, 2011) lista diferentes valores encontrados para variados cultivos no mundo.

Tabela 14: Eficiências energéticas de diferentes biocombustíveis

Matéria Prima	Local de cultivo	Eficiência Energética	Fonte
Beterraba	França	1,6	Malça e Freire (2006)
Trigo	França	1,9	Malça e Freire (2006)
Milho	E.U.A.	1,1	Shapouri et al (2002)
Milho	Itália	1,4	Ulgiati (2001)

Fonte: (Diaz, 2011)

No presente estudo, consideraremos a eficiência energética da usina Visitada como a quantidade de energia gerada pelo etanol produzido dividida pela quantidade de energia consumida para produzir o etanol. A Equação 3 demonstra numericamente este valor:

Equação 3: Cálculo de Eficiência Energética do Etanol

$$E.E. = (e.p.*v.e.e.)/(c.e.u.*Pc-a)$$

Onde

E.E = Eficiência energética;

e.p.= etanol produzido

vee=valor energético do etanol

ceu=consumo energético da usina (MJ/ha.ano)

Pce = Proporção de cana para etanol

De acordo com (Diaz & Carvalho 2013), a produção de etanol na usina – considerando o fator energético do etanol como 21,45J/litro – resulta em uma energia total gerada de 92.968,8MJ. Considerando que a energia total gasta nos processos de produção de açúcar e etanol foi 21.484,6MJ, e a proporção de cana utilizada para produzir etanol foi de 63%, chega-se ao valor de 13.569,3MJ empregados na produção de etanol. O valor de energia utilizável do etanol produzido, dividido pelo custo energético de produção de etanol (proporcional à quantidade de cana usada para tal fim) será a eficiência energética da Usina Visitada. O valor da eficiência energética encontrado pelos autores (Dias & Carvalho, 2013) foi 6,9.

Tabela 15: Valores de eficiência energética do etanol encontrados na bibliografia

Autor(es)	Eficiência Energética
PRESENTE ESTUDO	6,9
Diaz (2010)	8,0
Pereira (2008)	8,2
Boddey et al (2008)	9,0

Percebe-se que dentre os estudos listados na Tabela 15, a usina Visitada teve a

menor eficiência energética. Os valores de outros autores refletem termos gerais do setor sucroalcooleiro no Brasil, e para chegarem às respectivas conclusões, se valeram de médias nacionais dos mais diversos insumos e características de processos.

Comparado aos cenários descritos por outros autores, a usina Visitada sofre de um revés incontornável: o relevo. As plantações são localizadas em inclinações proibitivas ao uso de colhedeadas, Em terrenos inclinados, as máquinas que realizam a colheita mecanizada não podem trabalhar, e devido à escassez de grandes áreas planas no plantio, o uso deste maquinário se faz inviável, econômica e tecnicamente. A solução para a colheita é a colheita manual – realizando a queima prévia do canavial – com o apoio de tratores com ancinhos acoplados para o auxílio à derrubada da cana.

Devido à esta particularidade, a usina acaba consumindo mais energia fóssil, pois utiliza tratores munidos de ancinhos para colher em relevo íngreme, emitindo mais GEE, devido à necessidade de realizar queimadas para conseguir colher sem colhedeadas de cana.

4.3 Potencial de Geração de Biodiesel da Usina visitada

Partindo do pressuposto que a usina visitada irá aproveitar todo o CO₂ gerado a partir da fermentação do mosto da cana e da queima do bagaço, podemos calcular, hipoteticamente, a quantidade de biodiesel que a usina poderia produzir através de uma fazenda de algas.

De acordo com (SAT, 2011):

“O sistema será baseado em processos de Membranas. Os gases efluentes podem conter baixas concentrações de CO₂ (em torno de 5%), que serão elevados a cerca de 60-70% para utilização nas fazendas de algas.

Como a concentração final de CO₂ para uso em fazendas de algas não precisa ser elevada, o sistema se torna menos oneroso e opera com muito menor consumo de eletricidade

que os encontrados em processos industriais que demandam concentrações elevadas (> 90%), conferindo viabilidade econômica a todo o processo. Em casos onde a corrente gasosa efluente seja superior a 70%, esta etapa de separação poderá ser evitada, reduzindo custos com equipamento e operação.

O sistema não está projetado para extrair contaminantes existentes nos gases da queima de combustíveis, em especial o SOx, capaz de afetar o crescimento das algas, porém os mesmos já existem nas fontes emissoras (ex: térmicas ou caldeiras de usinas de bagaço de cana) para atender os requisitos CONAMA.

Ao final, um tanque pulmão enviará o CO2 para a biosfera e os reatores contendo as algas, que consumirão o mesmo durante o processo de fotossíntese.”

De acordo com (SAT, 2011), a fermentação do caldo da cana irá gerar CO₂ na proporção de 0,6kg de CO₂ para cada litro produzido de etanol. De acordo com (Cortez e Gómes, 1997), para cada tonelada de bagaço queimado em uma caldeira, será gerada 0,8 tonelada de CO₂ capturável. Os valores apresentados por (SAT, 2011), são 98 litros de etanol gerados usando 276kg de bagaço, ou seja, 0,35litros de etanol por quilo de bagaço (350l/ton de bagaço). O bagaço após queimado gera uma emissão que é sujeita à uma sequência de tratamentos; compressão, resfriamento e secagem, e, em seguida passagem através das membranas previamente citadas.

Conhecendo os fatores de emissão de CO₂ no processo de produção de etanol e a quantidade de etanol gerado e bagaço queimado na safra estudada, é possível calcular o potencial hipotético de geração de biocombustível de uma fazenda de algas da empresa SAT. Para cada tonelada de cana processada, são gerados 60kg de CO₂ na fermentação, que podem ser convertidos em 30 litros de etanol ou 12 litros de biodiesel. Considerando a mesma tonelada de cana, o bagaço queimado ao processá-la renderá aproximadamente 200kg de CO₂, que poderão ser convertidos em 98 litros de etanol ou 38 litros de biodiesel.

O processo da empresa SAT irá gerar 2,5 toneladas de algas para cada 5,5 toneladas de CO₂ capturado (SAT, 2011), numa proporção de 45,45%. Ainda de acordo

com a empresa, cada 2,5 tonelada de algas cultivadas são convertidas em 1,25 toneladas de óleo bruto.

A empresa SAT consegue condicionar o metabolismo das algas cultivadas para que os lipídios produzidos tenham as características desejadas pelo empreendedor. Segundo (SAT, 2011), é possível cultivar algas para atingirem uma fração de até 90% de óleo bruto refinável em biodiesel.

Como o intuito do presente estudo é traçar um perfil hipotético da adaptação de uma usina existente em uma usina mista de etanol e biocombustível de algas, a premissa adotada é de que o cultivo de algas estará sempre vislumbrando a maior quantidade possível de biocombustível.

Aplicando o rendimento do processo da fazenda de algas da empresa SAT, teremos o resultado hipotético apresentado em seguida às equações abaixo:

$$(1) \text{CO}_{2\text{RT}} = \text{CO}_{2\text{F}} + \text{CO}_{2\text{Q}}$$

$$(2) \text{CO}_{2\text{F}} = F_{\text{fer}} \times E_{\text{p}}$$

$$(3) \text{CO}_{2\text{Q}} = B_{\text{q}} \times F_{\text{cal}}$$

$$(4) O_{\text{bp}} = \text{CO}_{2\text{RT}} \times P_{\text{CO}_2\text{-A}}$$

$$(5) \text{BDp} = (O_{\text{bp}}/2) \times P_{\text{bd}}$$

$$(6) \text{BDp} = (P_{\text{CO}_2\text{-A}} \times (F_{\text{fer}} \times E_{\text{p}}) + (B_{\text{q}} \times F_{\text{cal}}))/2) \times P_{\text{bd}}$$

Onde:

$\text{CO}_{2\text{RT}}$ = total de CO_2 recuperável

$\text{CO}_{2\text{F}}$ = CO_2 advindo da fermentação

$\text{CO}_{2\text{Q}}$ = CO_2 advindo do queima de bagaço em caldeiras

F_{cal} = Fator de emissão das caldeiras

F_{fer} = Fator de emissão da fermentação

E_p = Etanol produzido

B_q = Bagaço queimado

O_{bp} = Óleo (de algas) bruto

P_{CO_2-A} = Proporção de conversão de CO_2 em algas

P_{bd} = Percentual de Biodiesel pretendido

BD_p = Biodiesel produzido

Para a equação (2) usaremos o fator de CO_2 de fermentação de (SAT, 2011) – 0,6kg/litro de etanol produzido – multiplicado pela produtividade da usina Visitada em litros de etanol – 55.433.726 litros de etanol – para chegar ao total de 33.260.235,6 kg, ou 33.260,235 toneladas de CO_2 capturável advindo do processo de fermentação do etanol.

Para a equação (3) usaremos o fator de CO_2 de queima de bagaço em caldeiras (Cortez e Gomes, 1997) – 0,8ton/tonelada de bagaço queimado – multiplicado pelo total de bagaço queimado pela usina visitada – 363.746,15 toneladas de bagaço (351.009,13 toneladas de bagaço próprio e 12.737,02 toneladas de bagaço comprado) – para chegar ao total de 290.996,92 toneladas de CO_2 capturável advindo do processo de queima de bagaço de cana nas caldeiras da usina.

Com estes dois resultados somados – equação (1) – chegamos a um valor total de 324.257,155 toneladas de CO_2 recuperável para a produção de algas.

Com a equação (4) podemos estimar quanto CO_2 a fazenda de algas poderia converter em algas cultivadas. Para tal valor, multiplicamos o total de CO_2 recuperável pela proporção de conversão em algas da fazenda SAT. A quantidade de algas cultiváveis será 45,45% tonelagem de CO_2 capturado, ou 147.374,9 toneladas de algas.

Com esta quantidade de algas, a equação (5) nos permite chegar ao valor final para a produção hipotética de biocombustível (no caso Biodiesel) através do CO_2

capturado dos processos industriais da usina. Este peso total de algas, de acordo com (SAT, 2011), cai pela metade uma vez que as algas são transformadas em óleo bruto, o que significa que o total de óleo de alga da usina seria 73.687,5 toneladas. Este peso de óleo puro seria convertido em biodiesel na proporção de 90% de seu peso, totalizando 66.318,7 toneladas de Biodiesel, ou 66.318.694kg.

De acordo com (SAT 2011), um quilograma deste Biodiesel de algas ocupa um volume de 1,11 litro. Fazendo a conversão de quilogramas para litro, teremos aproximadamente 73.687.437 litros de Biodiesel oriundos da conversão de CO₂ capturado.

4.4 Análise dos Resultados

4.4.1 Consumo Fóssil da Usina

O diverso maquinário agrícola e a grande quantidade de substâncias químicas empregadas no plantio, manutenção e colheita da cana de açúcar fazem com que as usinas modernas tenham um elevado consumo de combustíveis não-renováveis. O consumo calculado para o consumo de óleo diesel no processo produtivo foi de 266,7 l/ha.ano, o que, considerando a safra anual e a extensão total da usina visitada, representam o consumo de aproximadamente 4.058.449 litros de óleo diesel.

O valor em litros demandado pelo maquinário corresponde à 5,5% do potencial de geração de biodiesel.

Supondo que o biodiesel gerado possa substituir diretamente o diesel utilizado pelo maquinário, o potencial de geração (por safra) da fazenda de algas poderia abastecer os motores diesel por mais de 18 anos. Supondo que o biodiesel gerado fosse aplicado em uma mistura B20 (80% de diesel mineral e 20% de biodiesel), o abastecimento supracitado seria suficiente para mais de 90 anos.

De acordo com (Silva e Freitas, 2008), comparado ao óleo diesel padrão, as emissões oriundas da queima do biodiesel puro apresentam um acréscimo de 13,3% no conteúdo de óxidos nitrosos – neste caso representado por N₂O – e um decréscimo de 78,5% de CO₂. Aplicando estes reajustes nos fatores de emissão utilizados em (Diaz, 2011), poderemos através da metodologia do autor, chegar ao novo valor de 106,94 kg CO₂eq/ha.ano para a emissão originada pela queima de óleo diesel nos processos agrícolas da usina. Comparado ao valor original, de 495,19 kg CO₂eq/ha.ano, temos uma redução de 78,4%.

A redução estimada está de acordo com os achados de (Silva e Freitas, 2008), uma vez que a contribuição em GEE das emissões de N₂O é infinitésima (6×10^{-8} kg/MJ) comparado ao CO₂ (0,07kg/MJ).

Supondo que a redução na emissão de GEE da utilização de biodiesel B100 seja aproximada para 80%, a utilização do biodiesel produzido por uma fazenda de algas reverteria a totalidade das emissões do processo produtivo da usina. Considerando 73.687.437 litros de Biodiesel produzidos, pode-se dizer que a redução desta implantação seria equivalente às emissões de 80% deste montante – no caso 58.949.949 litros de Diesel. Considerando o valor usado por (Diaz, 2011), de 2,63 kg de CO₂eq/litro de diesel, esta redução seria da ordem de 155.339,6 toneladas de CO₂ equivalente evitadas por ano.

A usina Visitada emite 2552,5 kg de CO₂eq/ha.ano em seus mais de 15 mil hectares. O resultado desta emissão é de aproximadamente 38.836,3 toneladas de CO₂eq por ano. Considerando o potencial de redução da emissão de GEE ao se substituir óleo diesel por biodiesel B100 gerado por fazenda de algas, a proporção de GEE reduzido para GEE gerado na usina Visitada é de aproximadamente quatro para um. Em outras palavras, o potencial de geração de biodiesel de uma fazenda de algas faz com que a usina Visitada evite o lançamento de quatro vezes mais poluentes atmosféricos do que o processo de produção convencional de etanol.

4.4.2 Eficiência Energética Estimada

De acordo com (Diaz e Carvalho 2013), a usina Visitada tem uma eficiência energética de 6,9. Este valor foi obtido ao se dividir o potencial energético do etanol produzido pela usina, pelo consumo de energia do processo produtivo.

Adaptando a Equação 3 à adição do biodiesel potencialmente produzido pela fazenda de algas da empresa SAT, o acréscimo – considerando o uso de biodiesel B100 – seria a quantidade de biodiesel produzido em uma safra (aproximadamente 78 milhões de litros), multiplicado pelo fator energético usado pelos autores (35,5MJ/litro de diesel). O valor calculado é 2.615.904.013,5MJ.

Com a adição de aproximadamente 2,6 bilhões de MJ de biodiesel ao montante original de energia embutida no etanol, teremos uma nova eficiência energética de 20,73 para a Usina Visitada com fazenda de algas anexa.

Naturalmente, os valores obtidos são um potencial exagerado, uma vez que a produtividade reportada pela empresa SAT se refere à projetos-piloto.

4.4.3 Potencial Cenário de Biocombustíveis Brasileiros

O estudo apresentado aborda apenas uma de centenas de usinas sucroalcooleiras do Brasil. A implantação de fazendas de algas em usinas, de acordo com os resultados obtidos, possibilita um acréscimo de produtividade energética nunca antes visto no sistema produtivo sucroalcooleiro.

Considerando que uma das maiores críticas ao setor sucroalcooleiro é a expansão da lavoura para áreas importantes para a segurança alimentar da população e para a biodiversidade, a intensificação da produção de biocombustíveis nas terras já ocupadas

pela lavoura pode ser uma alternativa que acomode os interesses de críticos e produtores em geral.

De acordo com o Anuário da Agência Nacional do Petróleo, no ano de 2012, distribuidoras de diesel venderam aproximadamente 55,9 Bilhões de litros de diesel no ano de 2012.

O presente trabalho chegou ao valor potencial de 73.687.437 litros de biodiesel produzidos na safra dos 15.215 hectares da usina Visitada, o que resulta numa produtividade hipotética de 4.843 litros de biodiesel de alga por hectare. Fazendo uma aproximação grosseira, se utilizarmos a produtividade hipotética de 4.843 litros por hectare para a lavoura nacional de 8,5 milhões de hectares, chegamos a um montante de 41,165 Bilhão de litros de Biodiesel de algas, ou seja, mais que 70% de todo o óleo diesel comercializado no ano de 2012.