3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Panorama do Setor Sucroalcooleiro do Brasil

De acordo com o Ministério da Agricultura (MAPA, 2010)

"A lavoura de cana-de-açúcar continua em expansão no Brasil. As áreas em produção continuam com progressivo aumento, embora em menor ritmo nos estados da Região Centro-Oeste e Sudeste. Mato Grosso do Sul, São Paulo, Goiás e Mato Grosso foram os estados com maior acréscimo de áreas na parcela de colheita para a indústria, respectivamente, 61,8 mil hectares, 49,4 mil hectares, 47,5 mil hectares e 15,4 mil hectares. Este crescimento representa a consolidação das novas plantas inauguradas recentemente, bem como, pequeno crescimento de unidades mais antigas."

Ainda segundo a publicação, na safra 2012/2013, a cana de açúcar foi plantada em 8.520,5 mil hectares e aumentou em 2% em relação à safra passada, resultado que, segundo os autores, poderia ter sido maior, caso houvesse maiores investimentos.

Conforme indica a Tabela 2, quanto à produtividade, a média brasileira da safra 2012/2013 foi de 69.846 kg/ha, 4,2% maior do que na safra de 2011/2012. Quanto à produção total, a cana moída na safra 2012/2013 foi 595,13 milhões de toneladas, um aumento de 6,2% em relação as 560,36 milhões de toneladas de cana moída na safra de 2011/2012, mas no quesito Açúcar Total Recuperável (ATR), a safra 2012/2013 teve como média 136kg/t, contra 138kg/t da safra de 2011/2013. Um outro aspecto que sofreu redução - de 5,22% - foi a produção de etanol da safra de 2011/2012 para 2012/2013 (23,62 bilhões de litros, para qual se destinou 51% da produção de ATR). Destes valores, pode-se constatar que apesar do setor sucroalcooleiro estar se tornando mais sofisticado com o passar dos anos, ainda encontra-se sujeito às intempéries agrícolas, como por exemplo estiagens, que inibem a capacidade de transformar produtividade em etanol.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Tabela 2: Comparativo de área, produtividade e produção da Indústria Sucroalcooleira do Brasil: Safras 2011/2012 e 2012/2013

REGIÃO/UF	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil t)		
	Safra 2011/12	Safra 2012/13	VAR. %	Safra 2011/12	Safra 2012/13	VAR. %	Safra 2011/12	Safra 2012/13	VAR. %
NORTE	**34,400**	**41,990**	**22,10**	**73.522**	**73.837**	**0,43**	**2.529,2**	**3.100,4**	**22,60**
RO	2,770	2,560	(7,50)	56.712	64.330	13,40	157,1	164,7	4,80
AC	0,570	0,740	30,00	92.352	95.000	2,90	52,6	70,3	33,70
AM	3,780	3,680	(2,70)	75.918	73.270	(3,50)	287,0	269,6	(6,10)
PA	12,570	11,440	(9,00)	53.012	65.560	23,70	666,4	750,0	12,60
TO	14,710	23,570	60,20	92.872	78.310	(15,7)	1.366,2	1.845,8	35,1
NORDESTE	**1.108,220**	**1.113,510**	**0,50**	**56.755**	**50.825**	**(10,40)**	**62.896,7**	**56.593,9**	**(10,00)**
MA	39,570	41,900	5,89	57.255	53.300	(6,90)	2.265,6	2.233,3	(1,40)
PI	13,910	14,740	6,00	71.312	70.000	(1,80)	992,0	1.031,8	4,00
CE	1,990	2,150	8,00	60.000	78.000	30,00	119,4	167,7	40,50
RN	62,260	59,230	(4,87)	47.756	44.025	(7,80)	2.973,3	2.607,6	(12,30)
PB	122,590	124,800	1,80	54.842	47.725	(13,00)	6.723,1	5.956,1	(11,40)
PE	326,110	327,610	0,46	54.099	45.500	(15,90)	17.642,2	14.906,3	(15,50)
AL	463,650	445,710	(3,87)	59.755	53.000	(11,30)	27.705,4	23.622,6	(14,70)
SE	35,540	45,140	27,00	53.979	58.100	7,60	1.918,4	2.622,6	36,70
BA	42,600	52,230	22,60	60.031	65.975	9,90	2.557,3	3.445,9	34,70
CENTRO-OESTE	**1.379,370**	**1.504,110**	**9,00**	**66.866**	**70.645**	**5,65**	**92.233,5**	**106.257,5**	**15,20**
MT	220,090	235,500	7,00	59.765	68.460	14,50	13.153,7	16.122,3	22,60
MS	480,860	542,700	12,86	70.415	68.175	(3,20)	33.859,8	36.998,6	9,30
GO	678,420	725,910	7,00	66.655	73.200	9,80	45.220,1	53.136,6	17,50
SUDESTE	**5.220,970**	**5.248,540**	**0,50**	**69.353**	**73.906**	**6,60**	**362.089,8**	**387.897,4**	**7,10**
MG	742,650	721,860	(2,80)	67.652	72.300	6,90	50.241,8	52.190,5	3,90
ES	66,930	62,110	(7,20)	59.821	57.370	(4,10)	4.003,8	3.563,3	(11,00)
RJ	41,310	45,110	9,20	53.446	43.185	(19,20)	2.207,9	1.948,1	(11,80)
SP	4.370,080	4.419,460	1,13	69.938	74.714	6,80	305.636,4	330.195,5	8,00
SUL	**613,140**	**612,390**	**(0,10)**	**66.240**	**67.404**	**1,80**	**40.614,7**	**41.277,4**	**1,60**
PR	611,440	610,830	(0,10)	66.269	67.522	1,90	40.519,5	41.244,5	1,80
RS	1,700	1,560	(8,00)	55.956	21.100	(62,30)	95,1	32,9	(65,40)
NORTE/NORDEST	**1.142,620**	**1.155,500**	**1,100**	**57.259**	**51.661**	**(9,80)**	**65.425,8**	**59.694,3**	**(8,80)**
CENTRO-SUL	**7.213,480**	**7.365,040**	**2,10**	**68.613**	**72.699**	**6,00**	**494.938,0**	**535.432,3**	**8,20**
BRASIL	**8.356,100**	**8.520,540**	**2,00**	**67.060**	**69.846**	**4,20**	**560.363,8**	**595.126,6**	**6,20**

FONTE: CONAB - 3º Levantamento: dezembro de 2012.

De acordo com a (UNICA, 2012), até 2020, 80% da frota de veículos leves será de veículos *flex*, e mundo afora, os programas de biocombustíveis estão crescendo em ritmo acelerado. Os autores citam em particular o programa dos Estados Unidos da América, que em uma década deverá levar seus índices de consumo de biocombustível a valores seis vezes maiores que o atual consumo brasileiro.

Os autores também citam a revenda de bioeletricidade (repasse de energia termoelétrica da queima de bagaço para as redes de distribuição do país), ônibus operando no Estado de São Paulo à base de combustível com 95% de etanol,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

motocicletas *flex* (segundo compilações dos autores, quase 11% da frota era *flex* em 2012) e certificados de boas práticas como "Bonsucro" e "Etanol Verde", importantes para a exportação de etanol. A combinação desta crescente demanda e diversificação interna e a capacidade de certificar sua qualidade internacionalmente, demonstram que o setor sucroalcooleiro do Brasil tem potencial para crescer e inovar cada vez mais.

3.2 Ciclo da Cana de Açúcar

De acordo com (Boddey et al, 2008), o ciclo de produção de etanol de cana é dividido nas seguintes fases:

-Plantio da Cana (que inclui o preparo do solo)
-Manejo de cultura
-Colheita
-Produção de Etanol

As três primeiras fases foram agrupadas pelos autores e consideradas "Operações de campo", apesar de não constituir uma fase propriamente dita, o transporte da cana de açúcar do campo para a usina é contemplado.

Parte-se do pressuposto de que para se plantar cana-de-açúcar – ou qualquer outra cultura – o solo já tenha sido adaptado ao plantio, sendo assim desmatado e sofrendo uma intervenção, mesmo que mínima, no sentido de modificar a topografia do terreno de forma a torná-lo mais propício ao cultivo.

Com um terreno apropriado, o processo se inicia ao se preparar o solo (processo em que se renovam as condições iniciais do solo para o plantio), plantar a cana por meio de mudas ou colmos, supervisionar e intervir no crescimento da cana, colher a cultura (com ou sem o auxílio de maquinário), transportar a cana ao parque industrial e por fim, transformar a cana de açúcar no produto final desejado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

3.2.1 Preparo do Solo

De acordo com (Santiago e Rosseto, 2007c), inicia-se o preparo do solo ao limpar o campo e analisar o solo – a fim de conhecer as necessidades de melhorias físicas e nutritivas do terreno. Em seguida cuida-se das propriedades mecânicas do solo, nivela-se o solo, a fim de planar o terreno e realiza- se a aração e gradagem do solo, que consistem, respectivamente, na passagem de um arado e de um gradil grosseiro pelo terreno. De acordo com (Camargo e Alleoni, 2006), o arado é basicamente um conjunto de braços de ferro espaçados entre 60 e 70cm que visam criar sulcos paralelos no terreno. Estes sulcos, similares aos demonstrados na Figura 3, terão uma profundidade de 20 a 25cm, que tem como finalidade revolver a camada inferior do solo. Esta inversão da camada inferior promove a quebra da compactação de solo sofrida em ciclos de plantio anteriores, aumenta a infiltração de água no solo e diminui a evaporação. Já o gradeamento consiste em passar outro conjunto de braços de ferro, menos compridos e menos espaçados, e tem a mesma finalidade, mas age quebrando torrões de solo maiores que se desprendem das camadas inferiores do solo.

O preparo do solo consiste em submeter o terreno a ser plantado ao tratamento físico imposto por maquinário agrícola de maneira a aprimorar as características físicas do terreno. (Santiago e Rosseto, 2007b), descrevem como "revolvimento de camadas superficiais para reduzir a compactação, incorporar corretivos e fertilizantes, aumentar os espaços porosos e, com isso, elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água".

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 3: Terreno da Usina Visitada em fase de preparo do solo para cultivo de cana

(Wursche e Denardin, 1980), afirmam que a dispersão de argilas – ao desagregar torrões de solo – que são retentoras de nutrientes, facilitam a lixiviação dos mesmos. Este revolvimento, segundo os autores, retira uma camada morta de solo, que age como uma manta protetora, e expõe o solo aos agentes de erosão e a maior evaporação da água armazenada no solo.

Uma das vertentes do preparo do solo é o Sistema de Plantio Direto, sistema conservacionista em que as alterações dos horizontes de solo são minimizadas a fim de evitar escorrimentos superficiais e aumentar a infiltração, o que reduz a erosão, uma vez que depois de colhida, a cana volta a brotar iniciando um novo ciclo da lavoura, de forma diferente ao que ocorre atualmente no plantio comercial, no qual a plantação é replantada. (Embrapa Centro de Pesquisa de Milho e Sorgo, 2006).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Segundo (Kaneko et al, 2010) tal sistema proporciona aumento na produtividade e renda da colheita de grãos, além de reduzir as intervenções nocivas ao solo e minimizar o uso de maquinário agrícola, configurando uma opção mais sustentável para o preparo de solo.

Segundo (Boddey et al, 2008) e (Ometto, 2005), este preparo ocorre ao iniciar cada ciclo da cana, que corresponde a um determinado número de cortes, onde geralmente ao primeiro se permite que a cana cresça mais. Segundo os autores (Santiago e Rosseto, 2007b), a renovação de um canavial pode ser feito pelo método químico, ou mecânico, onde se utiliza arado, grades, subsoladores, sulcadores e adubo, de maneira que a soqueira (nome dado as raízes que permanecem no solo após o corte da cana) seja retirada e possa-se reiniciar o processo de preparo do solo. A renovação pelo método químico inclui a adição de herbicidas aos processos originais, de maneira a facilitar o processo.

Além de herbicidas, o preparo de um solo para receber uma cultura de cana pode se valer de diversos métodos e substancias para agregar qualidade ao substrato, entre elas as correções e fertilizações, que, como (Rosseto et al, 2004) explica, são práticas utilizadas na melhoria da produtividade, procedidas de uma análise química do solo. As técnicas mais utilizadas para correção e fertilização segundo ele são:

- Calagem: utilizada para corrigir a acidez do solo, já que solo básico aumenta a produtividade. A calagem também neutraliza o alumínio tóxico e o manganês, aumenta a disponibilidade de cálcio, fósforo e magnésio.

- Gessagem: constitui importante fonte de cálcio e enxofre para as plantas, a um custo relativamente baixo.

- Adubação com vinhaça: utilizada como fertilizante para substituir a adubação química.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

- Adubação verde: utilizada com as vantagens de controle da erosão e de ervas-daninhas, reciclagem de nutrientes, aumento da atividade microbiana e da retenção de água do solo e fixação do N_2 atmosférico.

- Adubação mineral: Feita para corrigir o nitrogênio, o fósforo e o potássio.

3.2.2 Plantio da Cana

Após as intervenções no campo, o terreno se encontra em condições físicas e químicas de fixar e nutrir ao máximo a cana de açúcar.

De acordo com (Conde et al, 2005) o plantio de cana pode ser feito de maneira manual ou utilizando maquinário agrícola. Os autores relatam que ambas as vertentes apresentam índices de fixação e crescimento de mudas semelhante.

No processo mecânico, é necessário ter mudas de idade menor do que no sistema manual – nove meses para o plantio mecânico e onze a doze meses para o plantio convencional.

As mudas a serem plantadas pelo processo manual, segundo (Conde et al, 2005) devem ter um tamanho próximo a 40cm, e caso sejam colhidas por maquinário, deve-se adaptar a colhedeira a um trabalho mais sensível, de modo que não ocorram a saliências nem danos às gemas da cana.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 4: Fileiras de colmos de cana dispersadas na Usina Visitada

A distribuição da cana é um fator delicado no plantio. Segundo (Vitti e Mazza, 2002) para cada metro quadrado devem haver entre 12 e 16 gemas de cana (dependendo da variedade e da época de plantio). Gemas em excesso ou em falta irão acarretar em falhas na distribuição da cana pelos sulcos do terreno. A sensibilidade e o conhecimento do oficio fazem com que os trabalhadores rurais sejam proficientes na distribuição de colmos de cana. No regime de plantio manual, a força de trabalho é acompanhada de um caminhão carregado de cana de açúcar e o trabalhador é divido em dois grupos: um grupo que pica colmos de cana e um grupo que insere os colmos nos sulcos, cujo resultado pode ser visto na Figura 4.

De acordo com (Santiago e Rosseto, 2007b), o sulco onde o colmo de cana é colocado, devem ter de 25 a 30cm de profundidade, e não podem estar demasiadamente compactados, para não dificultar a fixação das raízes da cana ao solo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

3.2.3 Manejo de Cultura

Podemos resumir o manejo de cultura, como conjunto de procedimento realizados na lavoura entre o plantio e colheita, com o objetivo de garantir o crescimento saudável das plantas e otimizar a nutrição das mesmas. Os autores (Santiago e Rosetto, 2007a), com a utilização de defensivos agrícolas e adubo, entre outras metas, o manejo de cultura visa manter as características físico-químicas do solo, erradicar (ou minimizar) fungos, bactérias e pragas em geral, inibir espécies vegetais concorrentes e conservar o solo das erosões.

De acordo com (Diaz, 2010), adubo é usado para incrementar as quantidades de nutrientes para maximizar a produtividade de cana. O autor afirma:

"*Os minerais obtidos do solo em maior quantidade (gramas por quilo de matéria vegetal produzida) em qualquer cultura agrícola são chamados de macro nutrientes como o Nitrogênio (N), Fosforo (P) e Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Os nutrientes minerais exigidos em menores quantidades (miligramas ou microgramas por quilo de matéria vegetal produzida) são os micronutrientes: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), entre outros*."

(Santiago e Rosseto, 2007a), esclarecem a função base de macro nutrientes citados no trecho acima, afirmando que a brota e enraizamento da cana é diretamente estimulada pelo Nitrogênio, que quando saudável, apresentará uma folhagem verde de cor viva. Os autores explicam que o Potássio age no processo vegetativo da planta ao auxiliar na metabolização de açúcares por atuar na fixação de Nitrogênio e regular as trocas de água da planta. Segundo (Korndorfer, 2004), o Fosforo atua na formação de proteínas, fornecimento de energia e na divisão celular das plantas, entre outros processos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

3.2.4 Colheita da Cana-de-açúcar

Segundo (Groff, 2010) o mais indicado é que se colha na fase de maior acúmulo de açúcares – glicose, frutose, sacarose – por parte dos colmos de cana, e de maneira rente ao solo. O autor explica que se a cana sofrer um corte muito alto ou que venha a ser profundo, a rebrota desta cana será retardada ou seu crescimento será mais lento. Em seguida, segundo o autor, se cobre a terra entre as fileiras de cana com a folhagem da cana cortada, de forma a agir como manta protetora, ao reter a umidade e salvaguardar os nutrientes do solo de erosão. (Groff, 2010) afirma que após quatro ou cinco cortes consecutivos a lavoura deve ser replantada.

(Boddey et al, 2008) discorreram sobre dois métodos de colheita em seu trabalho, a denominada "colheita manual" – onde a cana sofre queima antes de ser cortada com facão pelos trabalhadores rurais – e a denominada "colheita mecanizada" – onde máquinas agrícolas (colhedeiras) realizam o trabalho de corte da cana. Em seu trabalho os autores afirmam que uma colhedeira equivale à força de trabalho de entre 80 e 100 homens, e cita que devido aos GEE emitidos na queimada da cana, tal atividade é criticada duramente por ambientalistas. Outros equipamentos são usados no apoio às colhedeiras, como tratores ou guinchos (exibido na Figura 6).

De acordo com a Lei nº 11.241 de 19 de Setembro de 2002 (de autoria do Governo do Estado de São Paulo), o processo de colheita por queimada será gradualmente proibido, com a meta de eliminá-lo até o ano 2020 devido a estas emissões. Existe, entretanto, uma exceção feita aos locais onde a geografia não permite o uso de colhedeiras – o abono é válido para terras com uma declividade igual ou superior a 12%, onde colhedeiras não conseguem trabalhar.

Nos locais onde é realizada a colheita manual, antes do corte manual, um grupo ateia fogo à plantação na companhia de uma brigada de incêndio – presente para evitar o alastramento do fogo. A cana verde é muito resistente a golpes de facão e sua palhada extremamente afiada, torna o trabalho de colheita manual impraticável sem queima

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

prévia da cana, devido aos riscos à saúde do trabalhador. Pode-se destacar também que a queima da cana afugenta animais peçonhentos que possam pôr a vida do trabalhador em risco. Na Figura 5 é mostrada a cana após sofrer queima.

Figura 5: Cana de açúcar após ação de uma frente de queimada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 6: Guincho utilizado na colheita

De acordo com (Santaella e Paes, 1995), a queima da cana tem como motivos as razões supracitadas e devem obedecer determinados procedimentos de segurança, como o uso de equipamento de segurança.

Ao ser removida a golpes de facão, a cana-de-açúcar é cortada em colmos de tamanho similar e carregada em caminhões transportadores de carga por trabalhadores rurais ou por maquinário agrícola.

3.2.5 Processos Industriais na Produção de Etanol

Após colhida, a cana-de-açúcar é transportada por caminhões até o parque industrial da usina. Geralmente – as usinas mais sofisticadas – realizam testes com a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

cana colhida, conforme explicitado na Figura 7, na Figura 8 e na Figura 9 para ter melhor conhecimento do teor de açúcar da cana colhida.

Figura 7: Amostrador de cana da Usina Visitada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 8: Pesquisador apontando no detalhe os orifícios de amostragem das caçambas de caminhões de carga

Após testes por amostragem, a usina é, segundo (Alcarde, 2007) submetida à lavagem. A lavagem da cana é realizada para assegurar que sedimentos não irão incorporar a massa de cana colhida, e evitar que impurezas aderidas aos colmos de cana entrem no sistema industrial da usina. Á água utilizada para tais lavagens pode ser oriunda de poços ou rios, caso a usina seja localizada próxima a algum. O destino da água de lavagem (enlameada) pode ser um tratamento para recircular na usina ou o descarte no ambiente. De acordo com (Ometto, 2005), o uso de água para lavagem de cana será entre 3 e 7m³ por tonelada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 9: Laboratório da Usina Visitada

Em seguida, a cana de açúcar lavada é direcionada através de garras (Figura 10) ou viradores de vagão para "mesas" (demonstrada na Figura 11), esteiras verticais, que servem para alimentar a cana de açúcar do processo produtivo automatizado na usina. A cana uma vez transferida das mesas para as esteiras convencionais, é sujeita a ação de picadores e desfibradores (Figura 12); que se tratam de eixos contendo um conjunto de laminas e prensas, que tem como objetivo, primeiramente picar os colmos de cana em pedaços menores, e em seguida triturar a cana, de forma a facilitar a extração do caldo de cana.

Os picadores e desfibradores rodam em eixos cujo movimento é proporcionado por turbinas da usina. Uma vez submetido aos tratamentos físicos primários, a fibra de cana é direcionada aos ternos de moenda, baterias de prensas que servem para extrair o caldo de cana por compressão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 10: Garra de cana

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 11: Mesa na qual é iniciado o processo de tratamentos físicos automatizados da Usina Visitada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 12: Desfibrador de cana da Usina Visitada

O resultado desta extração é um caldo impuro e bagaço de cana. O bagaço de cana em parte retorna às moendas e em parte é retirado para secagem e posterior queima em caldeira (queima que serve para impulsionar turbinas de vapor e movimentar as engrenagens das usinas).

O caldo impuro é decantado, para permitir a separação do lodo, que será filtrado (Figura 13). A mistura líquida (lodo) filtrada é circulada novamente no processo, e o resíduo sólido – denominado "torta de filtro" – é enviado ao campo, para ser utilizado como fertilizante.

O caldo, agora decantado, é evaporado em caldo concentrado, denominado "mosto", para ser direcionado aos tratamentos biológicos e químicos da usina.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Na maioria das usinas, o caldo é utilizado para gerar álcool combustível e açúcar, variando de acordo com a conveniência financeira do produtor.

No caso do etanol, o mosto é em seguida exposto a fungos denominados "leveduras". Segundo (Ometto, 2005), estes organismos, quebram as partículas de sacarose em etanol e dióxido de carbono, segundo a reação abaixo:

Equação 1: Fermentação da sacarose

$$C_6H_{12}O_6 \text{ (sacarose)} \rightarrow 2\ C_2H_5OH \text{ (etanol)} + 2\ CO_2 \text{ (dióxido de carbono)}$$

Este processo de quebra da sacarose é denominado fermentação, e ocorre em dornas de milhares de litros com temperatura e tempo de permanência controlados.

Figura 13: Filtro rotativo da Usina Visitada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Uma vez fermentado, o mosto se transforma em vinho, uma mistura líquida de alta turbidez e forte odor. Este vinho possui uma carga orgânica elevada e precisa ser tratado para que possa separar leveduras da fase líquida.

Através de um processo de centrifugação, as leveduras são removidas e redirecionadas às dornas de fermentação para que continuem a trabalhar. A parte líquida centrifugada é um etanol bruto que necessita sofrer separação de fases. Esta separação ocorre nas colunas de destilação (Figura 14).

Figura 14: Destilaria de etanol da Usina Visitada

Da transformação do mosto em vinho e do vinho em etanol, decorre a formação da vinhaça, líquido de grande demanda biológica de oxigênio. (Santiago e Rosseto, 2007), indicam a vinhaça como o maior poluidor dentre os efluentes gerados no processo de fabricação da cana de açúcar, e afirmam que entre 10 e 18 litros de vinhaça são formados para cada litro de etanol produzido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

A grande quantidade de vinhaça formada pelo processo produtivo, em geral, é armazenada em lagoas de vinhaça, conforme exibe a Figura 15, para que seja destinada ao campo através de caminhões dispersores ou canais de distribuição de vinhaça na plantação (Figura 16). Algumas usinas vêm implantando biodigestores específicos para converter a vinhaça em energia elétrica, mas a destinação final mais comum é a fertirrigação. Este destino reduz a demanda de adubos orgânicos e minerais, devido à alta concentração de nutrientes na vinhaça. Apesar das propriedades nutritivas, o excesso de vinhaça, segundo (Santiago e Rosseto, 2007), gera poluição dos corpos aquáticos (sejam aquíferos ou rios vizinhos) e salinização/mineralização do solo, o que acarreta na redução da produtividade das safras subsequentes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Figura 15: Lagoa de vinhaça da Usina Visitada

Figura 16: Canais de distribuição de vinhaça

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida do Etanol da Cana-de-Açúcar

Este trabalho tendo como objetivo comparar as produtividades de produção de energia da cana de açúcar, com e sem o incremento da tecnologia de fazenda de algas, deve ter conhecimento sobre o processo como um todo. Para entender melhor os impactos ambientais e produtos gerados pela geração do etanol, o presente estudo se baseia no trabalho de (Diaz, 2011). Assim como o autor, a composição deste estudo, ao nível do escopo do inventário de ciclo de vida e da atividade de produção de etanol foi listada pelos elementos que a compõe:

Função do sistema: O etanol produzido na usina visitada a partir do processamento industrial da cana-de-açúcar. A função do etanol é ser usado como combustível para automóveis de transporte (em sua maioria veículos de passeio *flex*)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Unidade e Fluxo de referência: Hectare por ano. A referência será o especo de um hectare donde durante um ano será cultivada a cana-de-açúcar.

Sistema de produto: O processo produtivo do etanol possui diferentes etapas previamente mencionadas. As unidades de processo que compõe a produção de etanol são:

-Primeira parte: preparo de solo/Plantio da cana
-Segunda parte: manejo de cultura
-Terceira parte: colheita da cana
-Quarta parte: processos industriais
-Quinta parte: distribuição

O sistema de produto, mostrado na figura 14, inclui, além das 5 unidades de processo a serem avaliadas, os itens de entrada para cada uma dessas etapas.

Fronteiras do sistema: Como apresentado na Figura 17, para cada etapa da produção de etanol, haverá fronteiras definidas pelas características da etapa em questão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

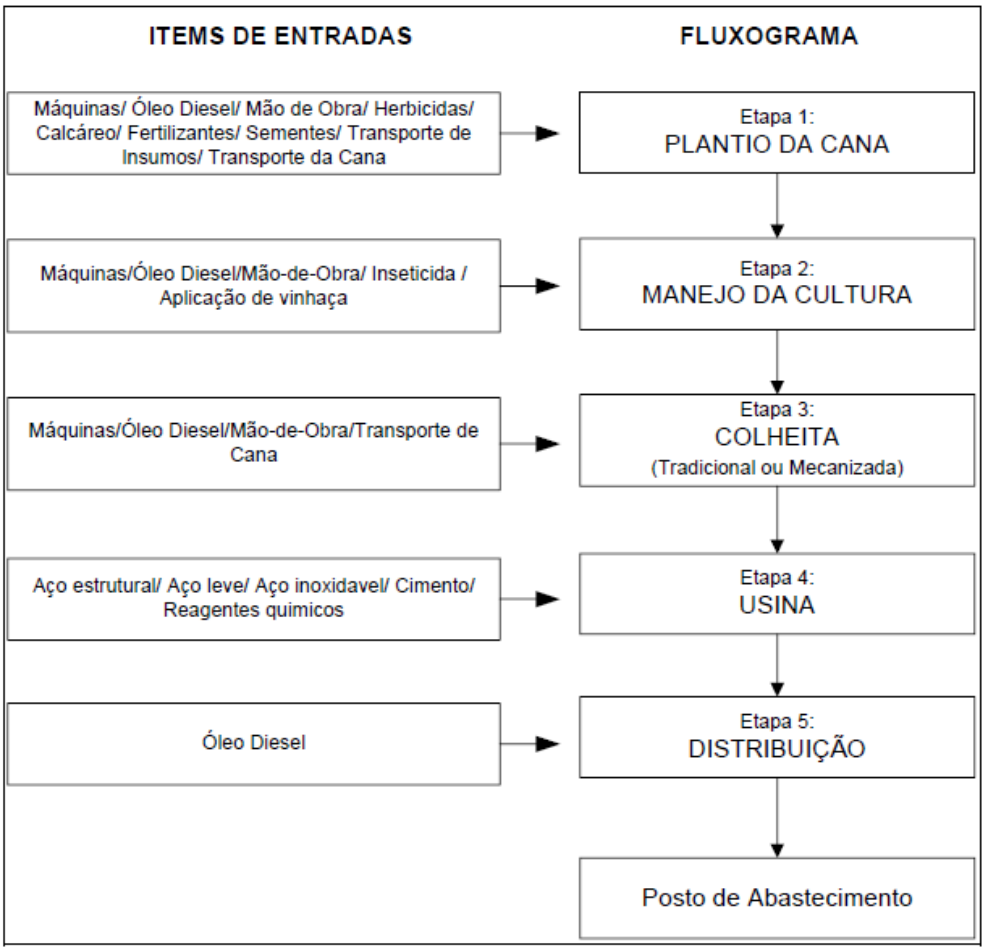

Figura 17: Fluxograma de etapas e entradas no processo produtivo de etanol

Requisito dos dados: O trabalho apresentado se iniciou de um projeto do INMETRO para desenvolvimento de uma metodologia própria para certificar o etanol brasileiro, e da participação recente da empresa SAT no mercado sucroalcooleiro Brasileiro. Contando com a colaboração de especialistas da Embrapa e do material técnico repassado pelos representantes da empresa SAT no Brasil, foi possível elaborar a parte conceitual do trabalho e em seguida adicionar o conteúdo coletado em pessoa na usina Visitada no Recife. Outras informações utilizadas vieram de referências bibliográficas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

3.4 Inventário do Ciclo de Vida do Etanol da Cana-de-Açúcar

A análise de ciclo de vida foi complementada por um estudo que observou consumo de recursos naturais, emissões associadas as etapas de produção e demandas energéticas. Este esforço é feito para melhor compor o inventário de ciclo de vida, que se torna essencial para compreender os impactos ambientais decorrentes do processo produtivo, além de também considerar a utilização de matérias primas.

A produção em larga escala de biocombustíveis requer alguma fonte de energia, e no caso do etanol, em muitas etapas, esta fonte é o combustível fóssil. Podemos citar como exemplo, o óleo diesel, que é utilizado para abastecer o maquinário agrícola que prepara solo, transportar insumos, colher a cana e distribuir o etanol. Este trabalho abordará de maneira mais ilustrativa a utilização de tais combustíveis posteriormente.

Seguindo a planilha desenvolvida por (Diaz, 2011) com o intuito de facilitar a interpretação de dados para compreender o ciclo de vida de uma usina de cana, demonstramos abaixo no Tabela 3, a composição de tal tabela. A tabela é dividida em três partes, subdivididas em diversas colunas conforme descrito a seguir:

A primeira parte aborda as entradas de insumos no sistema, especificando o tipo de entrada, a quantidade relativa ao tipo de entrada e a unidade relativa à quantidade, nos padrões do sistema internacional (neste caso, será hectare por ano).

A segunda parte aborda o consumo de energia, especificando um fator energético, em megajoules, relativo às unidades básicas das entradas e a energia total consumida/produzida por cada item por hectare por ano.

A terceira parte aborda emissões atmosféricas – mais especificamente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e dióxido de nitrogênio (N_2O). Para estes gases de efeito estufa, os potenciais de aquecimento global utilizados neste estudo foram, 1, 23 e 296,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

respectivamente, e sua unidade contextualizada será o CO_2 equivalente (CO_2eq). As subdivisões desta última parte, abordam primeiramente o combustível que melhor representa a emissão originada pela respectiva entrada (sendo "C", carvão, "P", petróleo, e "O" óleo diesel). Em seguida é retratada a quantidade de quilogramas de metano emitidos por megajoule utilizado, a emissão de metano em quilogramas por hectare por ano e finalmente a quantidade de quilogramas de metano emitido pela unidade básica do item. O mesmo retrato é feito em seguida para o óxido nitroso e para o dióxido de carbono. As duas últimas colunas da tabela, meramente indicam o valor de potencial de aquecimento global do metano e do óxido nitroso.

Tabela 3: Composição da tabela de análise de consumo energético e emissões de GEE de (Diaz, 2013)

ENTRADAS			ENERGIA		EMISSÕES									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ ha.ano	Fator Energ. (MJ/Unid. Bas.)	MJ/ha.ano	Font. Equiv.	Kg. CH4/MJ	Emissão de CH_4 (Kg./ha.ano)	Fator de Emissão (Kg. CH_4/Unid. Bas.)	Kg. N_2O/MJ	Emissão de N_2O (Kg./ha.ano)	Fator de Emissão (Kg. N_2O/Unid. Bas.)	Kg. CO_2/MJ	Emissão de CO_2 (Kg./ha.ano)	Fator de Emissão (Kg. CO_2/Unid. Bas.)	Kg. CO_2Eq./ha.ano
Etapa do Ciclo de Vida do Etanol															
Dado de entrada	Dado de entrada	Dado de entrada	Dado de entrada	B * D	Dado de Entrada	Dado de Entrada	E * G	H ÷ B	Dado de Entrada	E * J	K ÷ B	Dado de Entrada	E * M	N ÷ B	(H * Q) + (K * R) + P
p. ex. Óleo Diesel															
Etc...															
Subtotal				∑E			∑H			∑K			∑N		∑P
Total															∑P (todas as etapas)

3.4.1 Energia Fóssil na Produção de Etanol

A seguir serão expostos dados relevantes para a análise das entradas de combustíveis de origem fóssil em cada etapa da produção de etanol no Brasil.

O estudo realizado por (Macedo et al, 2004), contém uma coleta de dados que possibilitou a estimativa de uma densidade média de utilização dos equipamentos nas operações agrícolas. Estas densidades foram calculadas para tratores, caminhões e implementos agrícolas (como por exemplo arados ou subsoladores). Os valores encontrados pelo autores estão expostos na Tabela 4.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Tabela 4: Densidade média nacional de utilização de diferentes equipamentos

Equipamento	Densidade média de utilização (kg/ha.ano)
Tratores	41,8
Implementos	12,4
Caminhões	82,4
Total	136,6

Fonte: (MACEDO et al, 2004)

O consumo de combustível fóssil no caso estudado, o consumo de combustível será calculado no período de um ano. Diferentemente do trabalho de (Diaz, 2011), nosso estudo levará em consideração as diferenças entre médias nacionais de colheita manual e mecanizada, uma vez que o objetivo não é encontrar um valor global, mas específico a uma usina em particular. Levando isto em consideração, o cálculo da média de consumo, será:

Equação 2: Cálculo da Média de Consumo de Combustível na Produção de Etanol

$$Mca = Cp + Cm + Cc$$

Onde:

Mca: Média de consumo anual de combustível

Cp: Consumo de óleo diesel na etapa de plantio da cana

Cm: Consumo de óleo diesel na etapa de manejo da cultura

Cc: Consumo de óleo diesel na etapa de colheita

A Tabela 5, exposta abaixo, apresenta os valores utilizados por (Diaz, 2011) para chegar ao resultado de 29,4l/ha.ano de consumo anual médio de combustível fóssil (diesel) na produção de etanol no Brasil.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Tabela 5: Consumo de Óleo Diesel em diferentes etapas produtivas de etanol (média nacional)

Cosumo de Óleo Diesel	Quantidade (l/ha.ano)
Cosumo de Óleo Diesel na etapa de plantio da cana *(Cp)*	104,9
Cosumo de Óleo Diesel na etapa de manejo de cultura *(Cc)*	8,6
Cosumo de Óleo Diesel quando a colheita é mecanizada *(Ccm)*	74
Cosumo de Óleo Diesel quando a colheita é manual *(Cct)*	12,7

Fonte: (Macedo et al, 2004)

Durante a etapa de plantio, os principais equipamentos utilizados no cultivo de cana de açúcar são tratores com implementos agrícolas. No estudo de (Macedo et al, 2004), são enumerados tratores com seus respectivos implementos agrícolas e as finalidades com que operam, além de valores referentes a consumos e produtividade dos mesmos. A lista é exposta na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6: Dados do maquinário usado em operações agrícolas na Usina Visitada

N	Operações agrícolas	Equipamentos	Pot. cv	Implementos	Consumo (l diesel/h)	Capacidade de trabalho (ha/h)	Consumo específico (l/ha)
Operações para preparo de solo e plantio							
1	Aplicação de calcário	MF 290	78	Carreta distribuidora de calcário	6	1,78	3,37
2	Eliminação mecânica de soqueira	Valmet 1580	143	Eliminador mecânico de soqueira	12,8	1,85	6,92
3	Eliminação química de soqueira	MF 275	69	Bomba de herbicida	4	2,5	1,6
4	Gradagem pesada I	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	27,6	1,98	13,94
5	Subsolagem	CAT D-6	165	Subsolador de 5 hastes	26	1,16	22,41
6	Gradagem pesada II	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	27,6	2,04	13,53
7	Gradagem pesada III	CAT D-6	165	Grade pesada 18 D x 34"	27,6	2,04	13,53
8	Gradagem de acabamento	Valmet 1780	165	Grade leve 48 D x 20"	15	1,6	9,38
9	Sulcação e adubação	MF 680	170	Sulcador adubador duplo	11,5	1,26	9,13
10	Distribuição de mudas	MF 275	69	Carreta para plantio	3,3	0,79	4,18
11	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	MF 275	69	Cobridor de cana de 2 linhas	4,8	2,52	1,9
12	Cultivo químico (aplicação de herbicidas)	MF 275	69	Bomba de Herbicida	4	3,3	1,21
13	Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)	MF 292	104	Cultivador para quebra do meio	5,5	1,44	3,82

Fonte: (Diaz, 2011)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

As aplicações de tais maquinários relacionados acima correspondem, segundo (Diaz, 2011) a 29% de todas as operações agrícolas e a um valor de 337,5 MJ/ha.ano, de acordo com a Tabela 7, onde são apresentados, por segmento, os valores de consumo de energia fóssil por hectare por ano:

Tabela 7: Consumo de energia fóssil da Usina Visitada (segmentado)

ENTRADAS			ENERGIA	
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ ha.ano	Fator Energ. MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
PLANTIO DA CANA				
Máquinas	39,6	kg	8,5	337, 5
Óleo Diesel	0,0153	m^3	35.520	543,8
Mão-de-Obra	25,6	h	7,8	200, 7
Herbicidas	3,2	kg	451,7	1.445, 3
Calcário	367	kg	1,3	480, 8
Nitrogênio	56,7	kg	54	3.061, 8
Fósforo	16	kg	3,19	51, 0
Potássio	83	kg	5,9	488, 9
Sementes	2.000	kg		181,4
Transp. de Insumos	0,005	m^3	35.520	177, 6
Subtotal				6.969, 9

O estudo de (Diaz, 2011) aponta a etapa de plantio como consumidora de 52% de todo o combustível fóssil empregado na produção de etanol. Este valor foi uma média de 104,9l/ha.ano, onde, se valendo do poder calorífico do diesel, o consumo energético calculado foi de 543,8MJ/ha.ano. O consumo energético da produção dos Herbicidas e Nitrogênio aplicados no plantio, correspondem a mais de 50% do consumo energético total do processo produtivo da cana de açúcar, e a soma de todos os insumos agrícolas representa aproximadamente 85% do consumo de energia da etapa de plantio de cana.

Durante o manejo de cultura, diferentes implementos são utilizados junto aos tratores, segundo (Macedo et al, 2004), conforme mostrado na Tabela 8 abaixo. Se valendo desta tabela, (Diaz, 2011) pôde chegar ao valor de 8,62 l/ha, para o consumo de óleo diesel na etapa de manejo de cultura, correspondente à 4% de todo o óleo utilizado no processo produtivo de cana de açúcar. Este valor corresponde energeticamente a um consumo de 41,8MJ/ha.ano. A aplicação de vinhaça, subproduto

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

do etanol, corresponde ao consumo de aproximadamente 62% de toda a energia requerida nesta etapa. Este valor foi encontrado por (Diaz, 2011) considerando o uso de bombas diesel de 125 cavalos de potência com rendimento de 2h/ha.

Durante a colheita da cana de açúcar, a energia fóssil empregada se resume ao uso de máquinas agrícolas, uma vez que a alternativa a estas máquinas seria a colheita manual, com queima de cana – e ainda assim esta atividade requer o uso de combustíveis fósseis para atear fogo à cana e para abastecer os veículos que apoiam esta atividade.

No material consultado foi usada a premissa de (Boddey et al, 2008), (Macedo et al, 2004) e (Diaz, 2011), de que 60% da área de cultivo de cana no Brasil realiza a colheita manual com prévia queima da cana. A Tabela 8 mostra os implementos utilizados na colheita e a Tabela 9 o consumo de energia fóssil na colheita da cana, de acordo com a leitura de (Diaz, 2011).

Tabela 8: Maquinário e implementos usados na colheita de cana da Usina Visitada

Equipamentos	Pot. Cv	Implementos	Consumo (l diesel/h)	Capacidade de trabalho (t/h)	Consumo específico (l/ha)
Operações para a colheita da cana					
Case A-7700	330	Colhedora de cana combinada	40,4	45	74
MF 290 RA	78	Carregadora de cana	7,1	46	12,7
Valtra BH 180	180	Reboque de julieta/transbordo	9	35	21,2

Tabela 9: Energia consumida durante a colheita na Usina Visitada

ENTRADAS			ENERGIA	
ITEM	Quant. Bas.	Unid. Bas./ ha.ano	Fator Energ. MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
COLHEITA				
Máquinas	87,4	kg	8,5	744, 9
Óleo Diesel	0,0127	m^3	35.520	449,7
Mão-de-Obra	53,5	h	7,8	419,3
Transporte da Cana	0,0486	m^3	35.520	1.725, 6
Subtotal				3.339, 4

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

O consumo de óleo diesel calculado por (Diaz, 2011) representou 449,65MJ/ha.ano, correspondendo a 43% de toda a demanda do processo produtivo do etanol. O fator que mais onerou o consumo de energia durante a colheita foi o transporte de cana, segundo (Diaz, 2011), uma vez que este trabalho é realizado por caminhões que, segundo (Macedo et al, 2004), consomem, quando carregados e descarregados, 1,6 e 3 litros de diesel por quilometro percorrido, respectivamente. (Macedo et al, 2004) expõe que as distâncias percorridas por estes caminhões chegam à ordem de dezenas de quilômetros por cada uma das diversas viagens realizadas diariamente.

Durante a etapa industrial da produção de etanol, a usina de cana requer grandes quantidades de energia para realizar os processos de transformação de cana de açúcar em etanol. Esta energia, que pode chegar a 16,9GJ/ha.ano segundo (Pimentel e Patzek, 2007), provém da própria cana de açúcar, uma vez que as usinas utilizam o vapor da queima do bagaço da cana para alimentar as turbinas que realizam trabalho na usina, configurando a autossuficiência energética dos parques industrias das usinas de cana. (Macedo et al, 2004) estimam que, em grande parte das usinas, exista bagaço de cana em excesso que possa gerar entre 8 e 15% de energia sobressalente que poderia ser destinado para as redes de distribuição de energia do país. Apesar de autossuficiente, ainda existe um custo energético para que a usina seja construída, seja na mão-de-obra, seja na energia embutida na produção de materiais que compõe a usina (como aço ou cimento). (Diaz. 2011) apresenta um valor de 71,1MJ/ha.ano para a energia necessária na construção de uma usina, considerando todo o ciclo de vida de uma usina.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

3.4.2 Quantificação das Emissões de Gases de Efeito Estufa

Nos estudos de Análise de Ciclo de Vida de biocombustíveis consultados no presente estudo, existe uma preocupação em distinguir o tipo de emissão de GEE para os diversos elementos que geram estes poluentes. Os elementos mencionados têm suas origens em diferentes processos produtivos, o que faz necessário que se apliquem

diferentes fatores de emissão para cada uma das distintas origens mencionadas. No Anexo 1, são apresentados os diferentes fatores de emissão compilados por (Diaz, 2011) da literatura mundial. Os fatores de emissão utilizados para a energia consumida na produção de herbicidas, inseticidas e sementes, e na utilização de mão de obra, são, segundo (Boddey et al, 2008), melhor representados por óleo cru como fonte primária de energia. Tais valores foram retirados por (Diaz, 2011) do relatório "*Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories*" publicado por (IPCC, 2006a). Já no caso do aço usado nas estruturas industriais e maquinário agrícola, esta fonte foi considerada como melhor representada pelos fatores de emissão do carvão – por ser utilizado largamente em siderúrgicas Brasileiras. O transporte de insumos/cana, abastecimento de maquinário agrícola e bombas de irrigação, tem os fatores de emissão de sua fonte de energia representado pelo óleo diesel. Já no caso dos fertilizantes, calcário, nitrogênio, fósforo e potássio, o estudo de (Diaz, 2011), buscou valores individuais para estes fatores de emissão.

Na queima da cana considerou-se um fator de emissão calculado por (Boddey et al, 2008).

Do panorama nacional de emissão de GEE devido à produção de etanol, o estudo de (Diaz, 2011) apontou as particularidades de cada grupo de emissão:

"As emissões de CO_2 *são predominantes no plantio devido ao uso da energia dos combustíveis fósseis nos implementos, no maquinário e no transporte dos implementos. Durante o manejo da cultura a emissão do* N_2O *e de* CH_4*, derivada da aplicação da vinhaça é a maior e representa o 46% das emissões expressas em* CO_2 *equivalentes. Na colheita a principal emissão provém dos gases* CH_4 *e* N_2O *e numa porção mínima pela decomposição de N nas áreas não queimadas. A emissão derivada da infraestrutura das usinas na produção de etanol alcança aproximadamente 3% das emissões calculadas para o ciclo completo."*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

3.5 Fazenda de Microalgas na Produção de Biocombustíveis

A empresa "SAT" cria microalgas em tanques artificiais com o intuito de produzir biocombustíveis e outros produtos de algas, como Ácidos Graxos Polissaturados (e.g. Ômega-3) e proteínas para ração animal. As microalgas são cultivadas em ambientes industriais denominados de Fazendas de Algas. No modelo de fazenda de algas integrado a uma usina de cana de açúcar, o processo de criação de microalgas requer a entrada de Dióxido de carbono, luz solar e nutrientes nos tanques de cultivo para que as microalgas se multipliquem e cresçam, dentro de um parque industrial cuja unidade básica de área é de um módulo de um hectare.

O processo utilizado pela empresa SAT não é o único meio para se cultivar algas. Existem diversos tipos de cultivo, em tanques aberto e fechados, naturais ou artificiais. Os cultivos de alga em ambiente aberto podem ser realizados em tanques abertos ou corpos hídricos, como lagoas, por exemplo.

De acordo com (SHEEHAN, 1998), uma das principais vantagens de tanques abertos é a facilidade de construção e operação. No entanto, as principais limitações em tanques abertos incluem uma menor absorção de luz pelas algas, perdas por evaporação, a difusão de CO_2 para a atmosfera, e exigência de grandes áreas de terra. Nos casos em que se utilizam corpos hídricos, a contaminação por predadores e outros heterotróficos restringem a produção comercial de algas. Além disso, os mecanismos de agitação de sistemas de cultivo abertos são menos eficientes, acarrentando em taxas de transferência de massa muito pobres, resultando em baixa produtividade de biomassa.

O CO_2 envolvido no processo advém da fermentação do caldo de cana e posteriormente da queima de bagaço, e é direcionado das dornas e caldeiras para a fazenda de algas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

Uma vez direcionado às instalações da SAT, as misturas de gases sofrem separação para extrair o CO_2 e em seguida o gás é comprimido para que seja posteriormente dissolvido nos tanques de algas. O processo de separação de CO_2 dos outros gases presentes na queima de bagaço e fermentação do etanol se deve ao fato das cianobactérias serem induzidas a realizar fotossíntese na primeira etapa do processo industrial da fazenda de algas. A empresa utiliza a tecnologia de terceiros para separar, purificar e comprimir o dióxido de carbono, de forma que não é possível dar detalhes específicos da maneira como tais processos são realizados, uma vez que existe uma variedade de métodos e fornecedores de tais serviços em escala industrial.

A abordagem da empresa SAT para sua fazenda de algas obter biocombustível pode ter duas vertentes distintas. Ambas vertentes se iniciam com um tanque usado como "reservatório" de algas, onde se mantém uma população inicial constante para que se possa reiniciar um ciclo de cultivo de algas.

A primeira vertente visa obter biodiesel, óleos vegetais, conforme já mencionado, e a segunda, visa obter etanol.

No primeiro método, uma parcela da população inicial de algas é mantida em uma solução salobra e exposta a doses modestas de CO_2 e luz solar, apenas para subsistência. A outra parcela de indivíduos é direcionada para o denominado "fotobioreator", um tanque onde as algas se multiplicam graças à presença de luz solar capturada através de prismas solares. Estes prismas são capazes de concentrar a luz do sol e transmiti-la através de fibras óticas para dentro de reatores cilíndricos fechados. Nestes reatores ocorre a convergência dos raios solares captados para um eixo vertical que atravessa o centro do reator cilíndrico, de forma a realizar refração no sentido radial.

No interior do fotobioreator, além de luz, são fornecidos nutrientes utilizados são comumente pela agroindústria (Nitrogênio, Fósforo e Potássio). Tais nutrientes são diluídos e inseridos diretamente no reator. O CO_2 por sua vez é dissolvido no tanque e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

por bombas de água que realizam a circulação do meio aquoso em todos os tanques/reatores do processo. Esta água sendo circulada garante que haverá um crescimento homogêneo dentro do reator, evitando acumulo de algas nas entradas de luz, CO_2 ou nutrientes. Com tais recursos disponibilizados, as algas realizam fotossíntese e prosperam, até que se atinja uma população adequada para a próxima etapa do processo.

Na etapa seguinte, as algas são transportadas para um segundo reator, chamado reator mixotrófico, onde se impõe o regime heterotrófico de crescimento das algas, de maneira a maximizar a produção de lipídios nas mesmas. Isto é possível porque as algas tem a capacidade de realizar tanto a fotossíntese quanto a quimiossíntese. Após esta mudança de regime de iluminação, a estrutura das algas se modifica, realizando acúmulo de óleos graxos, e, uma vez que a estrutura física das algas atenda à demanda de produção ocorre a colheita e processamento das algas.

A colheita da algas é realizada por uma esteira que irá permitir que as algas ressequem. Toda a água salgada retirada do processo é reciclada para os tanques e com o passar do tempo, as algas com umidade reduzida serão coletadas e processadas de acordo com a preferência do produtor.

O produtos finais elaborados a partir do conteúdo extraído das algas são óleos, usados como biocombustível e/ou suplementos alimentares; e proteínas usadas como ração para animais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

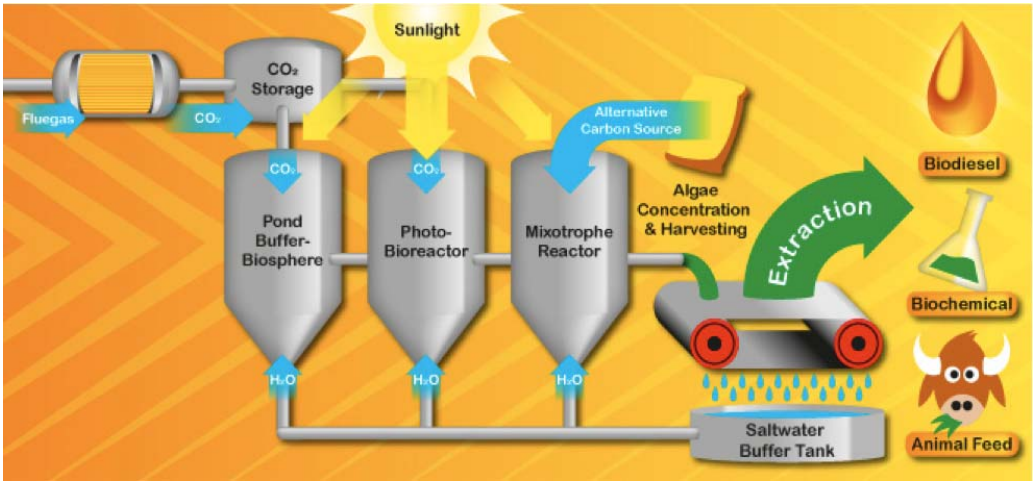

Figura 18: Processo produtivo SAT para algas naturais (Fonte: SAT, 2011)

Já a produção de bioetanol de algas ocorre em um ambiente industrial distinto do utilizado para produção. Por utilizar cianobactérias geneticamente modificadas capazes de excretar o etanol diretamente como subproduto de seu novo metabolismo, estas algas não poderão ser utilizadas para nenhuma outra finalidade além da produção de biocombustíveis, uma vez que devem ser mantidas vivas para continuar excretando etanol de algas.

Neste método, também são utilizados os fotobioreatores já descritos, mas a cultura de algas se dá com água doce, e os tanques inicial e final não são expostos à qualquer iluminação.

A segunda etapa deste processo será praticamente idêntico, em um fotobioreator, que fornece luz solar, CO_2 e nutrientes necessários para que as cianobactérias se multipliquem e passem a produzir bioetanol em seu meio de cultura. Este meio de cultura não é salobro, ao contrário do primeiro método, e é constantemente filtrado para recuperação do etanol que estas cianobactérias excretam.

O meio de cultivo é agua em que se adiciona sal até o desejado nível de salinidade. Eventualmente existe uma reposição de sal para compensar as perdas causadas pela biomassa. A quantidade de agua utilizada é de aproximadamente 10.000m^3/há.ano

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

considerando a reposição devido às perdas causadas pela biomassa. (SAT, 2011), definiu a situação de uso de nutrientes:

"São adicionados basicamente uma fonte de NPK (fertilizante comercial disponível no Brasil, cuja composição é confidencial) e de Carbono, que pode ser a glicerina loira produzida junto ao biodiesel no Brasil. Além disso, diversos elementos-traço são inseridos na nutrição das algas, porém, a quantidade utilizada é desprezível do ponto de vista comercial."

Considerando que o modulo comercial de fazendas de alga da empresa SAT é de um hectare, podemos considerar, para propósito de comparação, o consumo hipotético de 10.000m³ em um ano. O consumo de agua na produção de etanol, de acordo com (MENEZES KO, 2008) é de 0,459m³/ton de cana, e este valor aplicado à produção de cana da usina a ser estudada – 1.132.287,52 toneladas no ano estudado – nos fornece um consumo total de 519.719,97m³ de água consumidos em um ano. A proporção de água consumida na produção de etanol é aproximadamente 50 vezes maior que a de uma fazenda de algas.

Neste fotobioreator, a população de cianobactérias é mantida estável, e com a filtragem da mistura líquida presente no reator, acaba-se, reduzindo a concentração de etanol no meio e estimulando as cianobactérias a produzirem mais biocombustível.

No terceiro e último tanque, ocorre uma decantação onde a água retirada desta mistura é reinserida no sistema de cultivo, e o etanol separado é direcionado à destilaria da usina.

Ao final de 80-90 dias, toda a cultura é descartada de forma, pois perde a informação genética inserida inicialmente (tornando-se incapaz de excretar etanol), e se inicia uma nova cultura com algas vindas do tanque inicial, ou "*Start-up Pond*".

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA

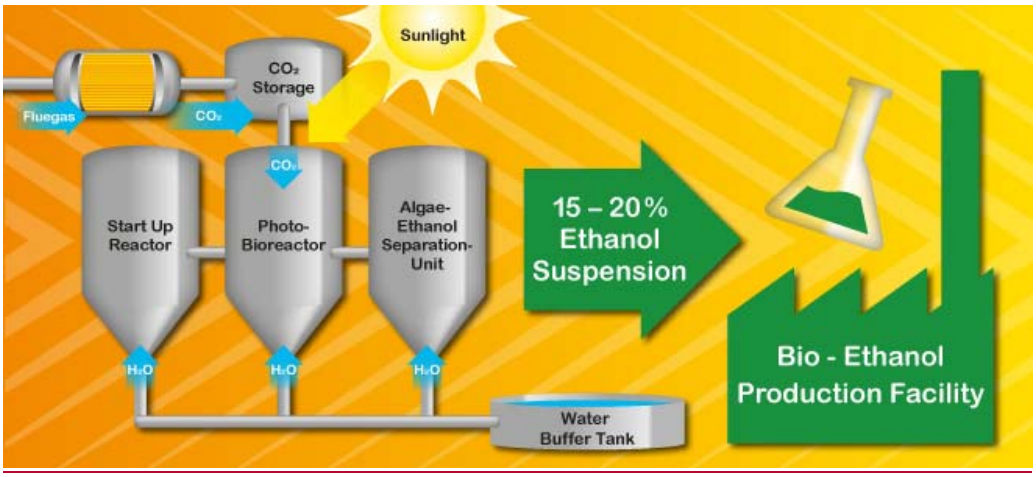

Figura 19: Processo SAT para produção de bioetanol de cianobactérias geneticamente modificadas (Fonte: SAT, 2011)

Nos últimos anos algas tem sido bastante estudada com o intuito de assegurar sua viabilidade na obtenção de diversos subprodutos, incluindo combustíveis. De acordo com (http://www.unapcaem.org/publication/bioenergy.pdf), já foram estudadas mais de uma dúzia de espécies de algas, a fim de melhor conhecer suas propriedades bioquímicas e sua capacidade de gerar lipídios para uso em diversas finalidades. A empresa SAT, em seu processo de produção de biodiesel, utiliza a alga Nannochloropsis Salina, e para seu processo de obtenção de bioetanol, utiliza uma cianobactéria geneticamente modificada e patenteada. O presente estudo não entrará em detalhes quanto aos rendimentos de outras espécies de algas ou cianobactérias, uma vez que se restringe ao caso especifico da adoção da tecnologia da empresa SAT em uma determinada usina de cana-de-açúcar Brasileira.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112355/CA