

## **Produção de bioetanol de raízes de mandioca em usinas de pequeno porte.**

Prof. Dr. Cláudio Cabello – CERAT/UNESP

O setor sucroalcooleiro brasileiro experimentou uma forte e consistente evolução tecnológica a partir dos anos 70 no século passado quando da implantação de um ambicioso programa para diminuir a dependência do petróleo importado, que foi denominado à época de Proalcool. O programa investiu muitos recursos no desenvolvimento de uma sistema de produção que focou a cana de açúcar como a matéria prima vegetal fornecedora de carboidrato para os processos de fermentação e para tanto os investimentos foram direcionados para dois pólos bem distintos, quais sejam: i) uma tecnologia agrícola mais otimizada em termos de produtividade e custos e, ii) a melhoria das usinas produtoras incorporando novas tecnologias de processos. Os investimentos produziram consistentes resultados e hoje o Brasil produz etanol a um custo inferior a US\$ 0,50 por litro o que é considerado um indicador aceitável em relação a outras fontes de biocombustíveis conforme mostra a Tabela 1.

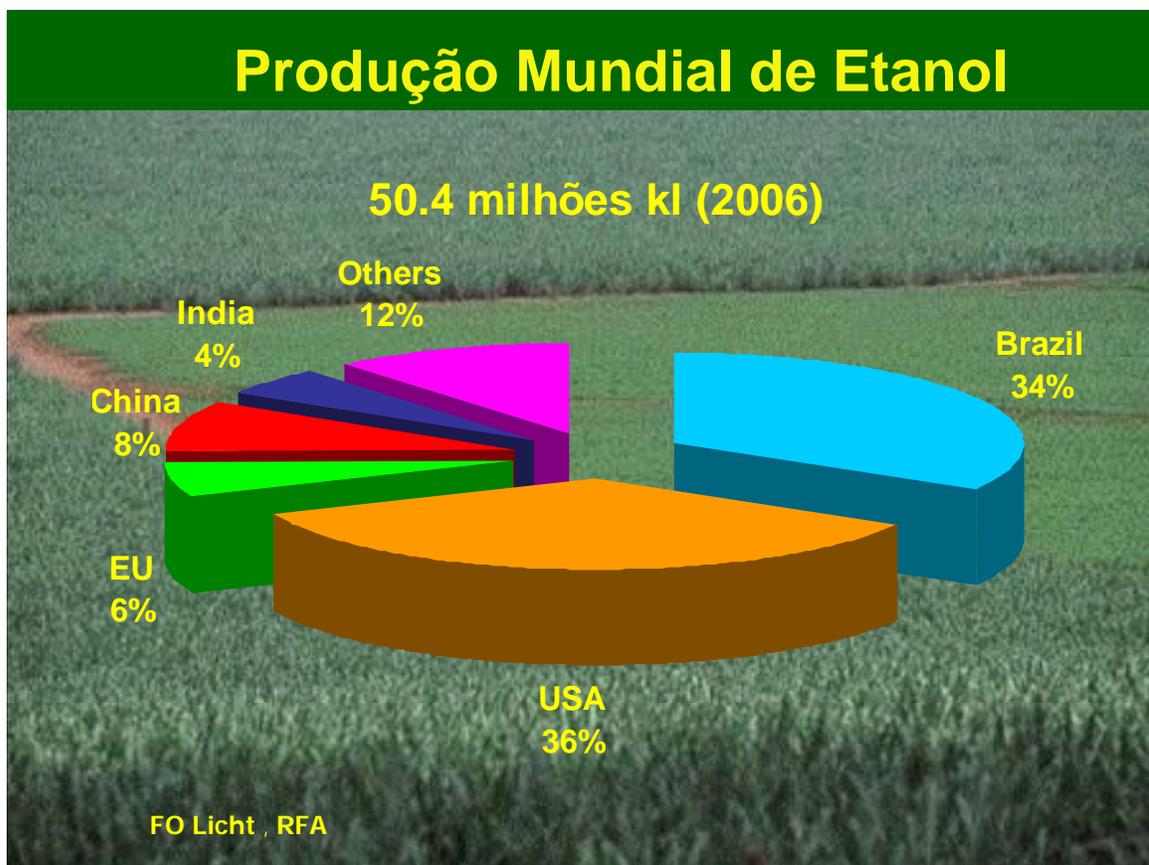
Tabela1: Custo de produção de biocombustível.

<b>Biocom/mat.prima</b>	<b>US\$/L gasolina ou diesel eq.</b>
<b>Etanol</b>	
Cana	0,25 – 0,50
Milho	0,50 – 0,80
Beterraba	0,63 – 0,83
Trigo	0,70 – 0,95
Lignocelulósico	0,80- 1,10
<b>Biodiesel</b>	
Gordura animal	0,40 – 0,55
Óleo vegetal	0,70 – 1,00
Lignocelulose (FT)	0,90 – 1,10
<b>Gasolina/Diesel1</b>	0,16 – 0,50

1 – Preço petróleo US\$ 60,00.

Fonte: Doornbosch, Steenblink, (2007)

A repercussão destas inovações levaram o setor a alcançar uma produção de 22,5 bilhões de litros de etanol na safra 2007/2008, com previsão de atingir 24 bilhões de litros neste ano de 2009 (ÚNICA, 2009). Esta produção coloca o Brasil como o 2º maior produtor mundial de etanol por uma pequena diferença em relação aos USA e provavelmente devido a uma fase de estagnação que o setor viveu nos anos 1985 a 1995. Na gráfico 1 é possível verificar a relação com os outros países produtores.



Fonte: CORTEZ,L. (2009)

Figura 1 – Distribuição da produção mundial de etanol.

A cana de açúcar recebeu então investimentos e incentivos que estimularam toda uma cadeia de agentes como Universidades, Institutos de Pesquisas, empresas privadas, órgãos de governo, políticas de subsídios, fartos recursos e desta forma ele cresceu e hoje apresenta resultados que compensaram estes esforços. Todas estas conquistas serviram como um aprendizado que permitiu o domínio das tecnologias de produção de biocombustíveis diretamente das fontes de carboidratos disponíveis na matéria prima vegetal selecionada que no caso foi a cana de açúcar.

A mandioca também foi testada como fornecedora de carboidratos mas dos 9 projetos financiados no início do Proalcool, restou apenas 1 unidade produtora de etanol de amidos localizada na região do Paranapanema no estado de São Paulo que utiliza também o amido de milho considerando as naturais variações de custos que apresentam estas matérias primas.

A produção de etanol por fermentação de substratos amiláceos vem sendo objeto de intensas pesquisas que buscam otimizar a conversão destes materiais de um modo mais rápido e a menores custos possíveis visando a sua intensa utilização como combustível veicular. Dentre estas matérias primas vegetais fornecedora de amidos o milho tem sido objeto de maiores investigações devido principalmente à sua presença no cenário econômico norte-americano (GRAY et al, 2006).

No Brasil a utilização da mandioca como fonte de carboidratos para produção de etanol sempre foi considerada tomando-se como referencial a cultura da cana de açúcar que lhe concorre com vantagens nada desprezíveis. De um lado uma cultura predominantemente de utilização na alimentação na forma *in natura* ou como farinha atendendo extensas populações e de outro uma cultura praticada intensivamente para produção de açúcar que suprindo a demanda interna, acessa importantes mercados de exportação.

Fatores outros determinaram a convergência de recursos financeiros e humanos no desenvolvimento de tecnologias que continuamente otimizam a produção de cana de açúcar e também a melhorias no processo agroindustrial, de modo que após a maturação destes investimentos a atualidade oferta um sistema altamente resolutivo na produção de açúcar e álcool a custos acessíveis. O mesmo não aconteceu com a cultura e agroindustrialização da mandioca que tem caminhado com o apoio tradicional de organismos de fomento à pesquisas e não despertando maiores interesse para investimento de capital privado. Tendo esta realidade como cenário, tanto uma como a outra fonte de matéria prima apresentam características de produção de carboidratos que ao longo do tempo vem sendo competitivas com o desenvolvimento de novos clones de variedades de mandioca que vão aos poucos incrementando uma maior produtividade no campo, racionalização no manejo da cultura, desenvolvimento de melhorias na produção agrícola, etc que tem provocado melhorias global na produção. Lorenzi (2005) em um projeto de envergadura tem buscado identificar e estabelecer parâmetros agrônômicos e fitotécnicos relevantes para produção de mandioca em escala de 6.500 há; os desafios são enormes devido ciclo da planta ser em torno de 11 a 15 meses; inexistência de

defensivos; manejos testados; mecanização da colheita; aplicação de defensivos, etc. Ou seja, para a cultura da mandioca existem ainda fronteiras que não foram suficientemente identificadas e dominadas e daí as suas potencialidades são ainda sub-avaliadas.

A produtividade da cultura mandioca tem apresentado uma melhora considerável devido principalmente à organização que o setor tem experimentado em anos recentes quando novas agroindústrias de extração de fécula surgiram e propuseram parcerias estimuladoras à melhorias na produção que se traduziram em ganhos recíprocos. Ofertando assistência técnica gratuita a seus fornecedores de raízes, introduziram novas formas de manejo, novas variedades com maior produção de amido, técnicas agrícolas eficientes, remuneração pela concentração de amidos, etc e deste modo estimularam a produção de raízes de mandioca que neste ano de 2005 atingiu 27,5 milhões de toneladas (IBGE, 2008).

Segundo a ABAM (2008) a produção de fécula de mandioca em 2008 foi de 546,5 mil toneladas o que representa um consumo em torno de 2 milhões de toneladas de raízes e portanto a produção excedente está sendo consumida na forma *in natura*, como farinhas, polvilho azedo e outros produtos. As agroindústrias existentes não estão consumindo toda a produção de raízes nas regiões onde estão instaladas em virtude do excesso de oferta que provoca uma depressão nos preços e desestímulo que poderá afetar a próxima safra e este efeito já é bem observado nesta cadeia produtiva. Este efeito periódico de alta produção versus baixa produção a cada 3 anos impede que planejamentos estratégicos de longo prazo robusteça a cadeia produtiva da mandioca pois do lado da agroindústria os investimentos precisam ter retorno tanto quanto os agricultores ressarcimento aplicados nos plantios e os lucros decorrentes. Aumentar as possibilidades de absorção deste excedente de raízes de mandioca em regiões onde esta cultura se identifica com a região parece ser mais um avanço na direção de estabilização desta oscilações periódicas que são prejudiciais a todos os atores do segmento, além obviamente do desenvolvimento sócio-econômico produzido.

A busca de tecnologias para absorção deste excedente tem sido em duas frentes: 1) um atuação política que através de legislação imponha adição de fécula na farinha de trigo importada (Projeto de Lei 4679/01 em votação no Congresso Nacional) e 2) transformação desta matéria prima amilácea em etanol através de processo fermentativo. As duas alternativas não são excludentes e devido a uma significativa demanda que se apresenta ao mercado, acredita-se que o etanol seja contemplada com recursos do setor privado independentemente de qualquer ação política de protecionismo.

Considerando estes fatos, o setor produtivo empresarial busca no mercado empresas fornecedoras destas tecnologias e não encontra atualmente respaldo para aumentar o nível de segurança dos projetos devido à falta de experiências e mais ainda de empresas em funcionamento. No estado de São Paulo existem 03 unidades de produção de etanol a partir de amidos que mantêm relacionamento com o CERAT/UNESP que usam milho e quirera de arroz como matéria prima. A mandioca apresenta custos oscilantes impedindo que contratos de fornecimento sejam realizados sobre bases frágeis de fornecimento de matéria prima. Não é porque a matéria prima não é adequada e sim por que o setor produtivo não entende o significado de parcerias e montagem de estratégias de longo prazo para crescimento do setor consumidor de seus produtos. Novamente o círculo de causa e efeito se realiza e produz perdas para todos os elos da cadeia produtiva.

Saito e Cabello (2006) estudaram a recuperação de amidos remanescentes nos farelos residuários da agroindustrialização da mandioca e verificaram a eficácia do tratamento hidrotérmico de processamento que hidrolisa-o a monossacarídeos. Ensaio indicaram nenhum efeito inibidor às leveduras quando o hidrolisado foi utilizado em processo de fermentação etanólica e isto indica promissora possibilidade do aproveitamento integral dos amidos presentes em raízes de mandioca que são posta para serem processadas nas agroindústrias de extração. As análises indicaram concentrações de 5 a 7% de amido das raízes que não são extraídos na fecularia, ficando retido nos farelos que são normalmente descartados. Estes valores representam algo em torno de 15 a 20% de amido que são perdidos ao meio ambiente apesar de ter transitado pelo sistema da agroindústria.

Quimicamente todos os amidos são iguais, composto de resíduos de  $\alpha$ -D-glicose unidas através de ligações glicosídicas formando extensos polímeros, mas que apresentam propriedades diversas conforme sua origem botânica. Basicamente é composto por dois tipos de macromoléculas: amilose um polímero linear e amilopectina um polímero altamente ramificado cuja estrutura molecular e proporção, afetam diretamente a funcionalidade do amido. Os grânulos de amido absorvem água e a sua estrutura sofre expansão devido a presença da água que fica retida. Quando amidos são aquecidos em excesso de água, a estrutura cristalina se rompe e as moléculas de água ligam-se às hidroxilas das amiloses e amilopectinas através de ligações hidrogênio, causando a ruptura e seqüente solubilidade do amido.

Para que ocorra uma conversão eficiente das macromoléculas do amido já gelatinizado a compostos de baixo peso molecular é necessário a ação coordenada de muitas enzimas cujas especificidades são descritas:

**$\alpha$ -amilases (EC 3.2.1.1 - 1,4- $\alpha$ -D-glucano gluconoidrolase)** correspondem a endoamilases que atuam ao acaso ao longo das cadeias de amilose e amilopectina hidrolisando as ligações  $\alpha$ -1,4 e liberando maltooligossacarídeos. Também chamadas de enzimas dextrinizantes.

**$\beta$ -amilases (EC 3.2.1.2 1,4- $\alpha$ -D-glucano maltoidrolase)** são exo-enzimas que hidrolisam a penúltima ligação  $\alpha$ -1,4 a partir da extremidade não redutora da cadeia de amilose ou amilopectina liberando maltose e não sendo capazes de hidrolisar ligações  $\alpha$ -1,6 dos substratos ramificados.

**$\alpha$ -D-glucosidase (EC 3.2.1.20  $\alpha$ -D-glucosídeo glucoidrolase)** são extensamente distribuídas entre os microrganismos, incluindo fungos, leveduras e bactérias. Estas enzimas são exo-hidrolases que hidrolisam ligações glicosídicas do tipo  $\alpha$ -1,4 e/ou  $\alpha$ -1,6 de oligossacarídeos de cadeia curta formados pela ação de outras amilases.

**exo-1,4- $\alpha$ -D-glucanases (EC 3.2.1.60/3.2.1.98)** são exoamilases que ao invés de liberar sucessivas unidades de maltose, originam maltotetrose e maltohexose como os maiores produtos da ação enzimática.

**Glucoamilases (EC 3.2.1.3 1,4- $\alpha$ -glucano glucoidrolase)** são exoamilases que produzem  $\beta$ -D-glicose a partir da extrimidade não redutora da cadeia de amilose, amilopectina e glicogênio através da hidrólise das ligações glicosídicas  $\alpha$ -1,4 removendo sucessivas unidade de glicose. As glucoamilases hidrolisam também ligações do tipo  $\alpha$ -1,6 mas com uma velocidade muito menor. Também são chamadas de enzimas de sacarificação.

**Pululanases (EC 3.2.1.41  $\alpha$ -dextrina-6-glucanohidrolase)** são enzimas desramificantes que quebram as ligações  $\alpha$ -1,6 do pululano, que um polissacarídeo linear que consiste de maltotrioses unidas por ligações glicosídicas  $\alpha$ -1,6 e que não pode ser degradado por  $\alpha$  ou  $\beta$  amilases

**Isoamilases (EC 3.2.1.68 glicogênio-6-glucanohidrolase)** hidrolisam as ligações  $\alpha$ -1,6 da amilopectina, glicogênio e outras dextrinas.

O processo de hidrólise de amido utilizando enzimas amilolíticas permite que um cuidadoso controle de variáveis conduzam à diferentes produtos finais. A primeira etapa é a gelatinização seguida da liquefação do amido que é realizado em suspensões com 30 a

40% de amido que tem o pH ajustado para 6,0 a 6,5 adequado à ação da alfa-amilase. À suspensão são adicionado a enzima em quantidade recomendadas pelo fabricante pois cada um a produz nas diluições que entende ser mais adequada aos seus produtos. Em seguida a suspensão recebe calor sob agitação que produz a gelatinização do amido e simultaneamente a ação enzimática acontece devido à disponibilidade de substrato (amiloses e amilopectinas) ocorrendo dextrinização. Após a dextrinização por um período de 2 a 3 horas o hidrolisado apresenta um DE em torno de 5 a 8 e é então acidificado até pH 4,5 recebendo uma carga de enzima amiloglucosidase que efetuará a sacarificação num ponto ótimo de temperatura de 60°C. A enzima AMG (Novozyme, 2006) é muito utilizada na aplicação de 1 unidade enzimática para cada 4 gramas de amido originário da suspensão e o tempo de catalize é de 48 a 72 horas para atingir um DE de 93 a 96%.

Terminada a sacarificação, o líquido é denso com coloração amarelo acastanhado e a denominação xarope é muitas vezes aplicada. Se a utilização for para substrato de processo fermentativo ele segue para os fermentadores para ser diluído e semeado com leveduras e outros nutrientes. Na figura 2 pode-se observar o fluxograma resumido do processo.

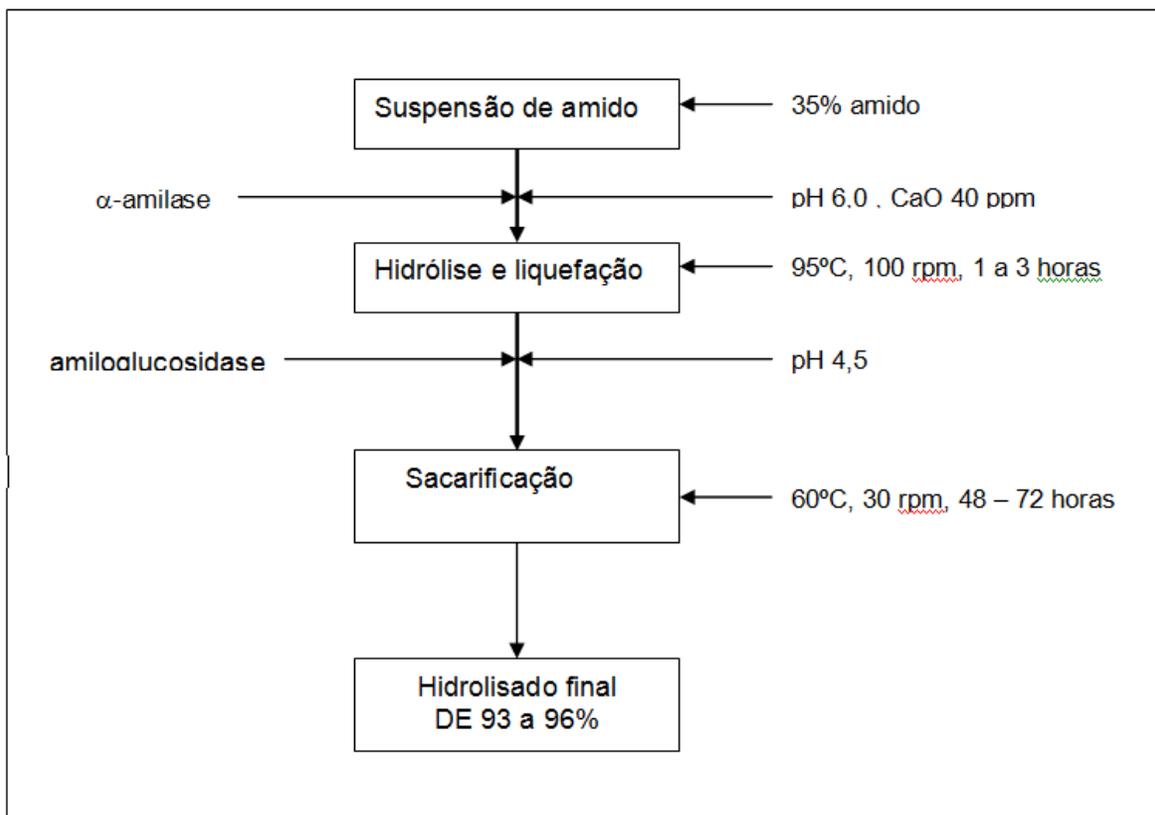


Figura 2 - Esquema de produção de hidrolisado de glicose pelo método enzimático.

A fermentação etanólica é o processo biológico através do qual leveduras desdobram os carboidratos presentes no substrato transformando-o principalmente em etanol e gás carbônico. O setor alcoleiro no Brasil utiliza leveduras do gênero *Saccharomyces* predominantemente a espécie *Saccharomyces cerevisiae* e suas diversas linhagens. Nas indústrias produtoras de etanol são usadas leveduras de panificação prensadas e secas, ou leveduras selecionadas, com tolerância a altos teores de etanol e boa velocidade de fermentação.

As leveduras apresentam necessidades nutricionais durante o processo fermentativo, as quais influenciam diretamente na multiplicação e no crescimento celular e também na eficiência da transformação de açúcar em álcool. As leveduras são capazes de assimilar mono, di e trissacarídeos e como são aeróbios facultativos, os produtos finais da metabolização dos açúcares irão depender das condições ambientais em que ela se encontram. Uma fração é transformada em biomassa, gás carbônico e água em aerobiose; a maior parte é convertida em etanol e gás carbônico em anaerobiose (fermentação alcoólica). Este metabolismo permite a formação de glicerol, ácidos orgânicos, álcoois superiores, acetaldeídos, etc.

Na Tabela 1 tres autores observaram diversos produtos da fermentação alcoólica onde observa-se a proporção de conversão do substrato.

TABELA 1 – Parâmetros de processo fermentativo utilizando leveduras.

Produto fermentação	Pasteur, 1863	Jackman, 1987	Basso et al. 1996
Fermentação da glicose	95%	90-95%	85-92%
Etanol	48,5	45,0-49,0	43,0-47,0
Gás carbônico	46,4	43,0-47,0	41,0-45,0
Glicerol	3,3	2,0-5,0	3,0-6,0
Ácido succínico	0,6	0,5-1,5	0,3-1,2
Ácido acético	-	0,0-1,4	0,1-0,7
Óleo fúsel	-	0,2-0,6	-
Butilenoglicol	-	0,2-0,6	-
Biomassa (massa seca)	1,2	0,7-1,7	1,0-2,0

Fonte: Lima (2001)

A formação de glicerol está em equilíbrio com o potencial redox da célula que é alterado pela formação de ácidos orgânicos, biomassa e presença de sulfito no meio de fermentação. A formação de glicerol também está relacionada a uma resposta ao

estresse osmótico do meio (altas concentrações de açúcares e/ou sais). O ácido succínico tem atividade antimicrobiana e são excretados pela levedura durante a fermentação.

A fermentação alcoólica pode ser representada pela equação de Gay-Lussac que é utilizada em cálculos de eficiência:



onde o balanço de massa indica que 1 mol de glicose é convertido a 2 moles de etanol e 2 moles de gás carbônico, que em termos mássicos seria:



estes valores indicam rendimento teórico de 51,1% sobre a massa de glicose.

Os sistemas de fermentação descontínuos podem ser dos tipos:

- 1] sistema de cortes – após a primeira fermentação divide-se o volume do mosto fermentado em dois recipientes completam-se os dois e deixa-se fermentar; envia-se um para destilação e outro serve para produzir o inóculo (pé de cuba) para mais dois e assim por diante.
- 2] sistema de reaproveitamento de inóculo – após a fermentação deixam-se decantar as leveduras, retira-se o substrato fermentado para a destilação, trata-se o inóculo precipitado no fundo da dorna (pé de cuba) e realimenta-se com novo mosto.
- 3] sistema de cultura pura – clássico método de fermentação que parte de culturas puras, multiplica-se a levedura em pré-fermentadores e inocula-se diretamente na dorna. É trabalhoso mas apresenta vantagens contra contaminações.
- 4] sistema de recuperação de leveduras – após fermentação passa-se todo o vinho nas centrífugas que fazem a separação (creme de levedura) que após tratamento com ácidos sulfúrico a pH 2,2 a 3,2, são inoculadas em outras dornas.

Os mostos necessitam complementação de nutrientes para as leveduras se multiplicarem razão pela são adicionados produtos para sua correção. Na prática das fermentações adicionam-se superfosfatos e sulfato de amônio na proporção de 1,0 g por litro de mosto, sais de magnésio 0,01 g/L mosto. Adicionam-se antibiótico ou antisséptico

e ajusta-se cuidadosamente a temperatura. A acidez mais conveniente para a fermentação é de 1 a 2,0 g/L mosto expressa em ácido sulfúrico e pH de 4 a 5,0.

O inóculo inicial geralmente é levedura de panificação encontrada no comércio na proporção de 10 a 20,0 g para cada litro de mosto numa dorna com 13 Brix e deixa-se fermentar após o que reparte-se na proporção de 10% em cada dorna para alimentação e início do processo de fermentação. O mosto em contato com leveduras em elevadas concentrações da ordem de  $3 \times 10^9$  cel/L permite que se entre rapidamente na fase tumultuosa do processo fermentativo com vantagens econômicas.

As dornas podem ser abertas ou fechadas e construídas geralmente em aço carbono com altura de duas vezes a largura em média. O controle da temperatura faz-se por meio de trocadores de calor de placas ou por meio de serpentinas instaladas dentro da dorna em contato direto com o mosto.

Os efeitos de alguns contaminantes e seus produtos metabólicos sobre a levedura são ainda pouco conhecidos, porém sabe-se que um nível elevado de contaminação pode causar redução na produtividade e no rendimento fermentativo devido à competição pelo substrato, à redução da viabilidade das células de levedura pela intoxicação por metabólitos do microrganismo contaminante e à floculação das leveduras pela ação das células bacterianas (Yokoya, 1989). A presença de bactérias lácticas na fermentação causam aumento da acidez do vinho pela produção de ácido láctico e acético e acarretam queda na porcentagem de células vivas das leveduras. Quando a acidez total atinge valores superiores a 4,8 g/L expressos em ácido láctico, ocorre diminuição na viabilidade das leveduras.

Gallo (1989) observou uma redução média de 44,5% da flora bacteriana quando o fermento recebeu tratamento com ácido sulfúrico por duas horas a um pH igual a 2,0. Alves (1994) trabalhando com mosto contaminado com uma mistura de microorganismos, observou que a eficácia da fermentação pode ser restabelecida com a aplicação dos antimicrobianos virginamicina, penicilina e cloranfenicol. Atualmente as indústrias de etanol tem considerado aceitável uma população bacteriana no mosto de cerca de  $10^5$  UFC/mL, não sendo economicamente viável reduzir este nível (Alcarde et al., 2003). Considerando o conceito de que as bactérias desenvolvem resistência aos antibióticos, um estudo de Narendranath e Power (2004) indica a estratégia de inocular uma alta taxa de leveduras como forma de minimizar os efeitos causados pela contaminação bacteriana.

Observa-se que as especificações de equipamentos e métodos de operação podem reduzir significativamente os indesejáveis efeitos das contaminações que

diuturnamente ocorrem nos processos de fermentação apesar das características particulares apresentadas em processos com *Saccharomyces cerevisiae*.

A destilação do vinho fermentado contendo em média 7 a 8% em volume de etanol é realizada em colunas de pratos fazendo a alimentação a certa altura da coluna, esgotamento da vinhaça pela base e o destilado pelo topo. O aquecimento das bandejas componentes da coluna faz-se pelo calor dos vapores do vinho que ascendem na coluna carregando o elemento mais volátil e em sucessivas etapas de equilíbrio atingem o topo com concentração elevada sendo então condensada liberando calor que é recuperado pelo vinho que está adentrando à coluna. A partir do ponto de entrada do vinho e caminhando no sentido da base, é realizada a etapa denominada esgotamento onde o vinho vai descendo perdendo o etanol até não ter mais nenhum traço na base de saída. Daquele ponto de entrada para cima é denominada coluna de retificação onde obtém-se o flegma com impurezas que serão eliminadas conforme o processo se realiza de bandeja em bandeja. O maior teor de etanol possível na destilação é de 97,2% em volume e 95,6% em peso porque nessa concentração a mistura de etanol e água é azeotrópica. A remoção desta água se faz mais recentemente com a utilização de peneira molecular que retém as moléculas de água e deixa passar o álcool com 99,9% de pureza obtendo-se então álcool anidro.

#### Planta piloto

Considerando que a cultura da matéria prima vegetal cana de açúcar apresenta características próprias para uma produtividade expressiva e que ela demanda condições edafoclimáticas específicas, outras plantas alternativas se apresentaram para substituí-la onde ocorrem condições desfavoráveis ou também por restrições por razões como por exemplo de zoneamento agrícola. No Brasil esta última é especialmente considerada na região amazônica por uma tendência para legislação que tem ganhado corpo e coincidentemente a mandioca se apresenta como a mais indicada fonte de carboidratos para processos fermentativos para produção de bioetanol. A mandioca é originária daquela bioma e a escolha do melhor material genético fica facilitada devido à ampla oferta de variedades já adaptadas, faltando apenas ajustes na implantação de tecnologias de produção intensiva.

Conhecedores desta novas disposições no cenário brasileiro juntamente com o interesse demonstrado por empresa fornecedoras de equipamentos em encontrar soluções para atender demanda do setor consumidor por “Unidades produtoras de etanol de pequeno a médio porte”, aproveitando também o fato da mandioca estar presente em praticamente todos os estados do Brasil como também de toda a América Latina, buscaram ajuda na Universidade.

Da discussão da problemática surgiu a idéia de formação de Consórcio das empresas, cada uma em sua especialidade, e coordenada pelo CERAT que forneceria todo o conhecimento para desenvolver um protocolo do processo. Isto requer uma planta piloto para realizar as diferentes avaliações das suas etapas tais como balanços de massas, energias, controle microbiológicos, sistema de inóculo fermentação, esforços mecânicos, dimensionamentos, materiais, sistema destilação e esgotamento, manejo resíduo líquido, etc de modo a se ter uma planta de baixo custo e alta produtividade e ótima relação custo operacional por produtividade.

As melhorias em um processo são ações dinâmicas e recorrentes buscando sempre do ponto de vista econômico “produzir mais a menores custos” que deverá ser sempre analisada por outros custos principalmente da afetação no produto, nos resíduos, em energias, etc. Ou seja, a planta piloto terá a finalidade de “testar” novas tecnologias em processos, em materiais, em matérias primas, enzimas amilolíticas, tempos, volumes, etc, sendo um laboratório para as melhorias não só focando o custo mas também testando novas soluções e hipóteses científicas. Do lado da Universidade é muito importante esta aproximação com o setor produtivo e suas demandas por novas soluções tecnológicas, pois a atualização e formação de recursos humanos altamente especializados necessita esta visão das empresas. O benefício será de todos.

A existência desta planta piloto num Centro de Pesquisas de uma Universidade pública da envergadura da UNESP no centro do estado de São Paulo, dispondo de uma avançada infra-estrutura de equipamentos analíticos, laboratórios, recursos humanos altamente qualificados, alunos de pós-graduação, acesso a bibliotecas, contato com especialistas diversos, possui as habilidades para solucionar os desafios tecnológicos que lhes serão propostos na execução dos trabalhos e ensaios de procedimentos. A qualidade do produto relacionada com o tipo de procedimento adotado é um tópico especialmente considerado pois produzir etanol de qualidade para aplicação em medicamentos, fármacos, bebidas etc é diferente do que etanol para utilização como combustível; apresentam diferentes formas de produzi-lo e seus conseqüentes custos de

processo. Esta característica de realização de ensaios é de importância para verificar quais parâmetros são sensíveis e importantes para o controle do processo e que serão informados às empresas para que procedam a ajustes visando minimizar interferências ou potencializar efeitos desejáveis.

O setor produtivo de raízes tropicais busca outras alternativas para comercializar a sua produção que atualmente a consome na forma de farinhas, féculas, polvilho e outras formas menos significativas. A existência de unidades produtoras de etanol em organizações regionais de produtores poderia ser uma alternativa viável àqueles outros congestionados mercados pois o produto etanol é um produto de extensa utilização não só como combustível mas também na indústria química como solvente. Existe um mercado para este produto quase que ilimitado.

Organização de produtores agricultores em cooperativas que instalariam uma unidade produtora de etanol seria um modelo de sucesso pois tal arranjo produtivo verificado para produção de farinhas e/ou féculas demonstrou o seu acerto na forma de organização. Pequenas ou médias unidades de produção de etanol são portanto apenas um absorvedor e transformador da matéria prima mandioca e pode ser operada economicamente segundo parâmetros técnicos desenvolvidos especificamente para seus sistemas (e não adaptados de Usinas de cana de açúcar).

O projeto envolveu a participação de empresas de 3 segmentos, cada uma delas se incumbindo de uma das áreas mais especializadas de funcionamento da planta quais sejam: i) sub-sistema de recepção e tratamento da mandioca; ii) sub-sistema de produção do bioetanol, e iii) sub-sistema de destilação. Estas empresas parceiras trabalharam sob orientação do coordenador do projeto e juntamente com outras obras permitiram a realização das instalações físicas que estão em fase final.

A configuração de instalação dos equipamentos buscaram a máxima operacionalidade possível considerando os menores custos de sua construção e conforme pode ser observado no *lay-out* da figura 3. Alguns critérios de segurança observados indicam por exemplo a distância mínima de 30 metros da caldeira em relação às instalações das colunas de destilação, assim como o tanque reservatório de produto terminado que deverá localizar-se à uma distância segura e conter especificações particulares.

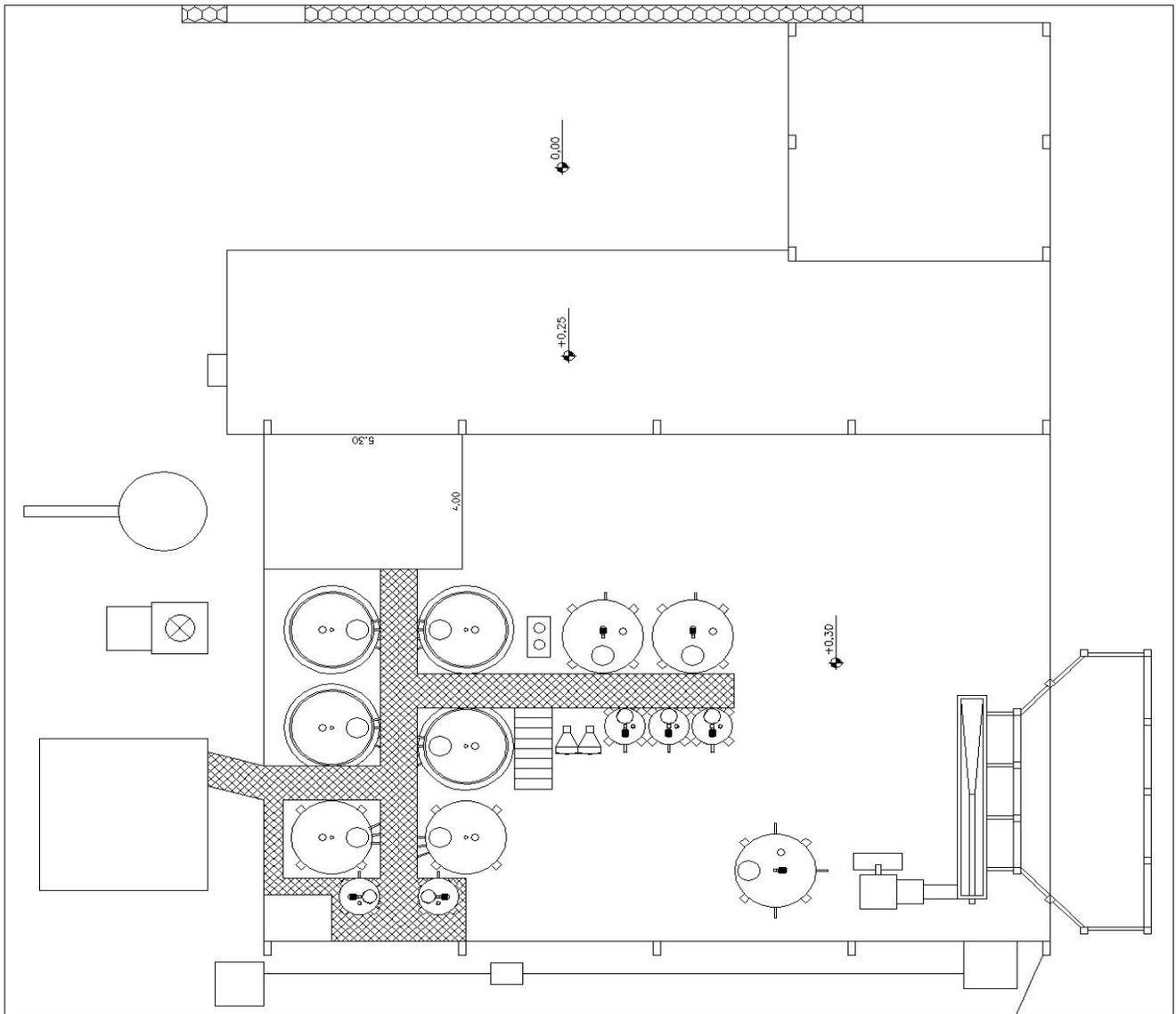


Figura 3 – Distribuição dos equipamentos componentes da planta de processamento.

i) sub-sistema de recepção e tratamento da mandioca

O sub-sistema de recepção e tratamento da mandioca teve seus equipamentos dimensionados considerando que esta planta piloto operasse com capacidade de até 3 t/h de raiz de mandioca ou de outras como inhame, batata-doce, etc. Houve um ajuste na sua capacidade horária de modo que no presente caso operasse a 1 t/h e utilizasse a vinhaça produzida na destilação para efetuar a lavagem das raízes no lavador carreando estes particulados e areias para o tanque de tratamento de águas residuárias.

Os motores que compõe o conjunto são de baixa potencia a exceção do motor do moinho de martelos das raízes que no presente caso também é uma inovação pois ele substitui com vantagens a sevadeira que requer constantemente a troca de serrilhas de tempos em tempos. A utilização do moinho de martelos dispensa esta manutenção recorrente mantendo constante o rendimento na produção de polpa utilizando tela com vazamento de 0,8 ou 1,0 mm, com uma relação de potencia de aproximadamente 10 CV para processar 1 t/h adicionando 20% de água potável. O desintegrador de raízes tem motor com potencia de 5 CV em cuja saída está acoplado a rosca elevadora das raízes fragmentadas (2 CV) até a caixa superior que contém a rosca dosadora (1 CV) que alimenta reguladamente o citado moinho de martelos. O conjunto possui pequena potencia instalada e capacidade de alimentação suficiente para até 3 t/h que poderia atender, em média, uma produção de até 500 L/h de etanol considerando a raiz de mandioca com concentração em torno de 40% em matéria seca. Este conjunto se complementa com um reservatório que recebe a vinhaça com uma temperatura elevada (60 a 70°C) e que durante o processo de estocagem e aplicação por gravidade sobre as raízes no lavador, remove sujidades e simultaneamente perde calor.

No fluxograma de operação deste sub-sistema as raízes de mandioca são descarregadas e depositada numa doca inclinada construída em concreto com capacidade selecionada para contenção de aproximadamente 25m<sup>3</sup>, que se aproxima a 12-15 toneladas em peso. No fundo está disposta uma rosca provida de motorreductor com 2 CV que adequadamente movimenta as raízes lançando-as por gravidade no lavador e daí segue o processo até que após a produção da polpa no moinho de martelos ocorre o seu bombeamento para o tanque de estocagem que funciona como um pulmão regulando o abastecimento de toda a planta de processo. Neste tanque tem início o tratamento da polpa com adição de bactericidas e enzimas para adaptá-la ao processo.

Este sub-sistema realiza toda as operações de recepção e condicionamento da matéria prima buscando o mais possível limitar e minimizar o nível de contaminação.



## ii) sub-sistema de produção do bioetanol

Neste sub-sistema ocorrerão operações que produzirão as transformações físicas, químicas e bioquímicas nos materiais que são processados envolvendo adição de outros produtos como catalizadores químicos, bioquímicos e biológicos. Ocorrem transformações de significativa complexidade mas com controlabilidade já facilitada devido ao conhecimento sobre os mesmos.

O produto, no caso a polpa da mandioca, é admitida nos reatores de dextrinização com capacidade de 1,5 m<sup>3</sup> que o submetem a um tratamento térmico a 90°C e agitação para otimizar a atividade do catalizador enzimático que já foi adicionado. Esta operação é em batelada seqüencial utilizando 3 reatores encamisados com tempos de enchimento de 60 minutos e injeção controlada de vapor direto no produto. Continuamente os reatores estão operando sendo alimentados, agitados e em transferência dos produtos. O hidrolisado em contínua transferência passa num trocador de calor para controladamente abaixar a sua temperatura a 60°C, receber adição de produtos químicos e enzimáticos e descarrega num dos reatores de sacarificação com capacidade de 12 m<sup>3</sup> com isolamento térmico onde sob agitação e tempo de residência ajustado realiza a reação enzimática para produzir um hidrolisado adequado à fermentação.

Na seqüência o hidrolisado passa por outro trocador de calor rebaixando sua temperatura e segue para uma operação de remoção dos particulados fibrosos existentes na polpa por meio de peneiras centrífugas que simultaneamente remove os particulados e promove uma diluição utilizando água potável que provoca também um novo abaixamento da temperatura. Nesta fase os riscos de contaminação são maiores devido a temperaturas mais baixas e a disponibilidade de açúcares no meio que o tornam mais suscetíveis a ação bacteriana apesar do baixo valor de pH. Especial cuidado com as operações de desinfecção são requeridos nestes equipamentos e tubulações de condução dos materiais.

O hidrolisado segue para os reatores de fermentação onde alimentam o inóculo (pé de cuba) de leveduras que já foram transferidas dos pré-fermentadores após receberem tratamento ácido, aeração e substratos. O ajuste da concentração final de açúcares redutores para a fermentação se dá nesta etapa onde avaliações no hidrolisado indicam a adição controlada de água potável no reator na forma de um ajuste mais fino do processo. O acompanhamento do processo de fermentação é considerada etapa que requer maior cuidado na condução para que o controle da contaminação fique dentro dos

níveis aceitáveis para não comprometer a qualidade final do etanol e então a adição de antiespumantes e antibióticos são avaliadas através de análises laboratoriais.

Terminada a fermentação o vinho é centrifugado sendo removida as leveduras e encaminhadas a um tanque denominado dorna volante enquanto as leveduras são descarregadas diretamente no pré-fermentador. Nesta etapa da operação a centrífuga estando instalada num posição elevada e assentada numa estrutura metálica com 4 metros de altura de modo que os dois fluxos de centrifugados são descarregados por gravidade diretamente nos seus respectivos receptores minimizando custos e riscos de contaminação/degradação.

As operações de enchimento dos reatores de dextrinização são controladas eletronicamente por um Controlador Programável que atua no sistema através de bombas, válvulas e sensores de nível. Estas operações podem ser reajustadas ou mesmo operar manualmente.

Os diversos reatores que compõe o sub-sistema são todos fechados e confeccionados em aço carbono assim como a tubulação de condução dos produtos, linhas de vapor e rede de captação de águas servidas. Todos os reatores, bombas, válvulas e linhas de produtos possuem conexão com água potável para lavagem e remoção de produtos e também conexão com a linha de vapor que produz a desinfecção após a lavagem com água potável ou solução de soda cáustica. Todos os equipamentos possuem porta de inspeção no tampo superior sendo acessados por passarela que faz a interligação entre eles permitindo acompanhamento das diferentes etapas do processo. A passarela interliga a estrutura suporte das colunas de destilação, trocadores de calor e principalmente o painel de controle na parte externa do prédio facilitando a inspeção constante do sistema.

As tubulações de produtos, linhas de vapor, rede de distribuição de água e os eletrodutos com distribuição da energia elétrica estão instalados debaixo da passarela de interligação e acessa os diferentes equipamentos de modo a permitir sua operação com segurança.

A configuração dos diversos equipamentos observou uma compactação que desta forma reduziu a necessidade de instalações mais amplas e desta forma permite a operação mais facilitada do processo reduzindo custos de operação. O conceito para a unidade de produção é de baixo custo de investimento e operação.





### iii) sub-sistema de destilação

Este sub-sistema apresenta sua maior complexidade numa planta de produção de bioetanol porque na etapa de separação de compostos que é requerido um consumo muito alto de energia, gerado grande volume de resíduos líquidos, demandado um controle de processo mais cuidadoso e do conjunto de atuações repercute na composição do produto final. O processo de destilação separa o etanol e o concentra entre 92,6 a 93,8 °INPM (95,0 a 96,1°GL) sendo a fração restante água e contaminantes que afetam a sua qualidade. Mesmo para uso carburante, outros contaminantes devem estar dentro de limites como por exemplo a acidez menor 30 mg/L; condutividade menor 500  $\mu$ S/m; pH entre 6,0 e 8,0 e outros citados em normas específicas (ANP, 2005).

O consumo de vapor no processo de destilação está ligado à concentração de etanol no vinho e, na maioria das unidades produtoras fica em torno de 7,0% em volume o que torna o consumo de vapor em torno de 3,0 a 3,5 kg/L etanol destilado sendo este um dos valores que indicam o dimensionamento da caldeira para o processo. Na planta piloto considerando o processamento estabelecido de ensaios para 1,0 t de raiz por hora e produzir teoricamente 180 litros de etanol hidratado, um valor de referência seria de 540 a 630 kg de vapor a 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> nas colunas além do consumo nas operações de hidrólise e das perdas na condução. A opção foi a instalação de caldeira com capacidade de 800 kg vapor a 10 kgf/cm<sup>2</sup>.

Uma característica importante para a planta instalada foi o dimensionamento das colunas de destilação atendendo uma faixa de produção entre 100 a 500 L/hora sendo divididas em dois troncos sendo:

#### 1. primeiro:

- coluna A de esgotamento com 18 estágios
- coluna A1 de epuração com 8 estágios
- coluna D de voláteis com 6 estágios

#### 2. segundo:

- coluna B1 de esgotamento flegmaça com 13 estágios
- coluna B de retificação de flegma com 32 estágios

Complementam o sistema as caldeiras, os condensadores E1 e E2, trocadores de calor E, J, K e recuperador de óleo fúseis.

A tecnologia aplicada é disponível e consolidada tendo recebido muitos aperfeiçoamentos ao longo dos anos de utilização em grande parte das unidades de produção de etanol existentes no Brasil.





## Conclusão

A planta piloto construída com o objetivo de realizar pesquisas na produção de bioetanol a partir de raízes de mandioca ou outras amiláceas é considerada um ponto de partida para avaliações de processos sob os aspectos de consumos de energia, de água, melhorias de rendimentos, aplicação de enzimas, configuração de equipamentos, ensaios com leveduras, balanços de energia/produtos/resíduos, aproveitamento resíduos, desempenho de conjuntos, avaliação de matérias primas, automação de processos, etc e tantos mais outros que somente um conjunto com determinada escala permite este tipo de estudo com um poder resolutivo mais avançado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAM [www.abam.com.br](http://www.abam.com.br) Produção de fécula de mandioca no ano de 2008.

ALCARDE, V.E., YOKOYA, F. Efeito da população de bactérias na floculação de leveduras isoladas de processos industriais de fermentação alcoólica. **STAB. Açúcar, álcool e subprodutos**, v.21, n.4, p.40-43, 2003.

CORTEZ, L. Perspectivas de pesquisa em cana e etanol. Workshop BIOEN/UNESP, São Paulo, 2009.

DOORNBOSCH, R.; STEENBLIK, R.: Biofuels: Is the Cure Worse than the Disease? Organisation for Economic Co-operation and Development, Round Table on Sustainable Development, Paris, France, September 11-12, 2007, p. 4.

GALLO, C.R. Determinação da microbiota bacteriana de mosto e de dornas de fermentação alcoólica. Campinas, 1989. 388p. Tese –Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade de Campinas.

GRAY, K.A., ZHAO, L., EMPTAGE, M. Bioethanol. Current Opinion in Chemical Biology, nº 10, p. 141-146, 2006.

IBGE [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) Produção mandioca junho/2008.

LIMA, U.A., BASSO, L.C., AMORIN, H.V. Produção de etanol. In: **Biotechnologia**. São Paulo: E. Blucher, v.3, cap 1, p 1-43, 2001.

LORENZI, J.O. Desafios do cultivo de mandioca em larga escala. IV Workshop sobre Tecnologias em Agroindústrias de tuberosas Tropicais. CERAT/UNESP, Botucatu/SP. Anais, 2006.

NARENDRANATH, N.V. POWER, R. Effect of yeast inoculation rate on the metabolism of contaminating lactocilli during fermentation of corn mash. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v.31, p.581-584, 2004.

YOKOYA,F. Microbiologia do processo de fermentação. In: EGUCHI, S.Y.; YOKOYA,F.; CANHOS, V.P.; GALLO, C.R. Pontos críticos microbiológicos em usinas de açúcar e álcool. Campinas: Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia André Tosello, p.1-22, 1989.

SAITO,I.M.; CABELLO,C. Produção de etanol a partir de hidrolisado obtido por tratamento hidrotérmico de farelo de mandioca. **Energia na Agricultura**, v.21, p.34-44, 2006.

UNICA – União produtores de cana. [www.unica.com.br/estatística](http://www.unica.com.br/estatística), 2009.