

**INSTITUTO
DE FÍSICA**

Bav 4
184037

preprint

IFUSP/P-238

ETANOL DE MADEIRA - BALANÇO ENERGÉTICO

M.E.M. Helene, G.M.G. Graça e J. Goldemberg

Instituto de Física, Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

B.I.F. - USP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
Caixa Postal - 20.516
Cidade Universitária
São Paulo - BRASIL

IFUSP/P 238
B.I.F. - U



ETANOL DE MADEIRA - BALANÇO ENERGÉTICO

Maria Elisa Marcondes Helene

Gilena Maria Gil Graça

José Goldemberg

IFUSP

INTRODUÇÃO

Tendo em vista o interesse pela implantação de hidrólise ácida de madeira no Brasil, é útil uma comparação entre os métodos que vem sendo cogitados.

No Brasil foram realizadas pesquisas sobre hidrólise ácida de madeira pelo ITAL²¹, em 1965 e pelo INT²², que atualmente estão em fase inicial de implantação de uma fábrica piloto em Lorena, Estado de São Paulo. A existência destes trabalhos chama a nossa atenção para a possibilidade de desenvolver uma fábrica a partir das experiências aqui acumuladas. Das tecnologias estrangeiras, podemos citar, em escala industrial, as fábricas da União Soviética⁶, atualmente em funcionamento.

Este trabalho visa comparar os processos Soviéticos e Suíços de hidrólise ácida entre si e com a cana-de-açúcar do ponto de vis-

ta do balanço energético, ou seja, dos gastos em energia para a implantação e operação das fábricas.

Os processos desenvolvidos no ITAL e INT não foram comparados com o Suiço e Soviético, uma vez que as diferenças de escala de produção não permitem uma comparação justa. Além disso, no ITAL, o método usado para atingir as condições de hidrólise foi injeção de ar comprimido, o que aumenta muito a quantidade de energia necessária à hidrólise.

Também fazemos considerações sobre os rendimentos que poderão ser obtidos com madeiras brasileiras de reflorestamento (Pinus sp. e Eucaliptus sp.), buscando estabelecer um paralelo com a produção do álcool a partir da cana-de-açúcar, uma vez que esse é o processo mais utilizado no Brasil.

DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS

A figura 1 mostra as várias etapas percorridas para se obter o álcool a partir da madeira através do processo Schöller de hidrólise ácida e mostra também os subprodutos.

No método Schöller ², durante a hidrólise, as condições de temperatura e pressão são drásticas (180°C e 10 atmosferas) e se fazem necessárias para que a cristalinidade da celulose seja rompida, assim como a ligação entre esta última e a lignina da madeira.^{1,3}

Os processos estão descritos abaixo e suas características encontram-se na tabela I.

O processo suiço ⁴ foi instalado em 1942 em Domat/Ems e esteve em operação até 1956, quando foi desativado. Os dados apresentados na tabela I, sobre este método, se referem às melhores condições de funcionamento da fábrica, o que aconteceu durante seu último período de operação.

Inventa Ems Group of Industries ⁵ retomou o projeto de operação desta fábrica em 1979, buscando maior otimização do uso do calor no processo de hidrólise.

O processo soviético está atualmente em operação nas fábricas da União Soviética ⁶, que é o único país com diversas fábricas de etanol existentes e em funcionamento. Estas unidades processam resíduos agrícolas (casca de arroz, resíduos de girassol), melão de beterraba e resíduos de madeira. Das 45 fábricas de hidrólise, apenas 14 produzem etanol (além de outros produtos) a partir da madeira. As 31 restantes utilizam o processo de hidrólise visando a obtenção de outros produtos, como furfural (para a indústria química) e fermentos (para ração animal).

Para a União Soviética, a economia de energia não é importante, uma vez que este país dispõe de gás natural em abundância para o fornecimento de energia.

METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO

Para o cálculo do balanço energético é necessário computar a energia gasta em todas as etapas necessárias para a obtenção final do etanol: cultura da madeira (fase agrícola), construção da fábrica (bens de capital) e operação da mesma.

Os insumos para a operação das fábricas estão apresentados na tabela II. Na forma direta são gastos energia elétrica e calor, sendo este último para a produção de vapor de água que é injetado no hidrolisador para obter as condições de hidrólise e também é usado para a destilação do etanol.

Além das quantidades de energia explicitadas acima, devemos considerar as que são gastas na produção do ácido sulfúrico e dos neutralizadores e que, portanto, indiretamente são consumidas na produção de etanol. A tabela III mostra a quantidade de

energia gasta na produção de um quilo destas substâncias (coeficientes de intensidade de energia).⁷

Outros reagentes são necessários na etapa de fermentação dos açúcares. No entanto, estas substâncias (fosfatos, amônia, etc.) são usadas em pequena quantidade, não superior a 5% da quantidade de H_2SO_4 . Como os coeficientes de energia destes produtos químicos não diferem em ordem de grandeza dos coeficientes de H_2SO_4 e neutralizadores, estes gastos de energia foram desprezados.

Desta forma, para a operação de uma fábrica de etanol de madeira, a energia elétrica, o vapor de água, o ácido e o neutralizador são as principais fontes de consumo de energia.

Para a implantação de uma fábrica de etanol de madeira há dispêndio de energia na construção civil e também na fabricação de equipamentos. Esta energia (indireta) pode ser computada através dos coeficientes de energia,⁷ como foi feito para o cálculo da energia indireta contida no ácido sulfúrico. Neste caso, ainda não dispomos de uma descrição detalhada das instalações e dos equipamentos necessários para uma fábrica de etanol de madeira, impossibilitando um cálculo preciso. Apesar disto, uma avaliação da ordem de grandeza destes gastos é possível, uma vez que a maioria dos equipamentos é semelhante aos utilizados nas fábricas de etanol a partir de cana-de-açúcar⁸. Esta semelhança nos permite usar o mesmo coeficiente médio de intensidade de energia. Por isto, usamos o valor obtido na referência 9 para as fábricas de etanol de cana-de-açúcar que, para um gasto de $US\$ 7670 \times 10^3$ (1978) prevê um gasto de $60,77 \times 10^9$ kcal, fornecendo um coeficiente médio de energia 8×10^3 kcal/US\$. Os preços das diferentes fábricas de etanol de madeira e seus tempos de duração encontram-se na tabela IV.⁶

A tabela V mostra os gastos de energia necessários para a obtenção de etanol, provenientes da hidrólise de uma tonelada de madeira seca, para os dois métodos estudados.

Não dispomos dos dados referentes aos gastos de energia na fase agrícola para o abeto da Suíça (madeira usada na Suíça) e para o abeto da Sibéria (usada na União Soviética). Para dar uma idéia da ordem de grandeza destes gastos, o consumo global na fase agrícola para uma cultura de eucaliptos é da ordem de 40×10^3 kcal/tonelada de madeira seca produzida e para o pinho é da ordem de 30×10^3 kcal/tonelada de madeira seca⁹ (produtividade de Eucaliptus saligna é 16,5 ton. de madeira seca/ha.ano e de Pinus oocarpa é de 13,0 toneladas de madeira seca/ha/ano).¹⁰

Os gastos de energia na fase agrícola da madeira correspondem a aproximadamente 1% do total de energia gasta, enquanto no caso da cana-de-açúcar⁹ a energia gasta na fase agrícola responde por 15% do total gasto na produção do etanol.

INDICADORES

Usamos três indicadores para o balanço energético :

- o primeiro deles é a razão entre a energia contida no etanol e a energia total que é gasta na sua produção. O calor de combustão adotado para o etanol é 5056 kcal/l.¹¹

- o segundo indicador é a razão entre a energia contida no etanol e a "energia externa" gasta para produzi-lo. A "energia externa" é toda a energia gasta para produzir o etanol, excetuada a energia gasta na produção do vapor de água utilizado. Isto porque o vapor de água pode ser produzido através da queima de uma certa quantidade de lenha na caldeira. A quantidade de lenha necessária para cada método é dada na tabela VI. Para o cálculo desta quantidade de lenha, assumimos um rendimento de caldeira igual

a 65%,¹² tanto para o método suíço, como para o soviético. O calor de combustão adotado para a lenha seca é 4100 kcal/kg.¹¹

- o terceiro indicador é a razão entre a energia contida no etanol e a energia proveniente do petróleo que foi gasta na sua produção. A energia sob forma de derivados de petróleo é computada através do gasto direto e indireto de petróleo em cada um dos insumos. Os gastos diretos de petróleo só ocorrem na fase agrícola e em transporte, sob a forma de óleo diesel e gasolina. Os gastos indiretos podem ser obtidos porque os coeficientes de energia estão desdobrados por fontes de combustível, permitindo o cálculo da proporção em que entram os derivados de petróleo nos gastos totais de energia para a produção de determinado produto. A tabela VII fornece a proporção de derivados de petróleo em cada insumo. Para este cálculo, assumimos que na produção de vapor de água não foi utilizado nenhum derivado de petróleo, uma vez que ele pode ser obtido pela queima de lenha.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS DADOS SOBRE O BALANÇO ENERGÉTICO

Os indicadores calculados na tabela VIII, para as fábricas soviética e suíça, mostram que não existem diferenças apreciáveis entre os dois métodos. Isto significa que, do ponto de vista do gasto de energia, a tecnologia desenvolvida na Suíça até 1956 é muito semelhante à das fábricas que operam atualmente na União Soviética.

O primeiro dos indicadores compara a energia contida no etanol com a energia total gasta para sua produção. Da energia investida na produção do etanol, consegue-se recuperar cerca de 30% no caso russo e cerca de 45% no caso suíço (1ª linha da tabela VIII). O grande dispêndio de energia, em ambos os métodos, ocorre em dois

momentos da produção do etanol: durante a hidrólise (na descrystalização da celulose, que exige altas pressão e temperatura) e durante a destilação de etanol, que após a hidrólise e fermentação em contra-se muito diluído (concentração de álcool cerca de 3%).

Uma vez que buscamos substitutos para a gasolina, não faria sentido usar outras frações do petróleo para fornecer a energia necessária à produção do álcool. Uma opção é usar lenha para obter a energia necessária nestas duas etapas, lenha que seria extraída da própria plantação que fornece a madeira para a hidrólise. Neste caso, a energia recuperada é maior do que o dobro da energia investida, para ambos os casos (2^a linha da tabela VIII).

O outro indicador compara a energia obtida na forma de etanol com a energia gasta sob a forma de derivados de petróleo, quando queima-se lenha para produzir o vapor de água. Neste caso, a quantidade de energia gasta sob a forma de derivados de petróleo é um quinto ou menos da energia que se consegue na forma de etanol (3^a linha da tabela VIII).

Na mesma tabela apresentamos os indicadores para o etanol a partir da cana-de-açúcar (eles foram calculados com os dados da referência 9). Incluindo os gastos de energia na fase agrícola, o primeiro e segundo indicadores são aproximadamente o dobro dos obtidos para o etanol de madeira. O terceiro indicador, se incluimos os gastos de energia na fase agrícola, é muito parecido aos indicadores para a madeira. Se excluimos os gastos na fase agrícola, o indicador que se refere ao consumo de petróleo é 12 vezes melhor para a cana-de-açúcar, o que mostra a importância que têm os gastos na fase agrícola, no caso da cana-de-açúcar. Estes gastos são efetuados na forma de óleo diesel para as máquinas agrícolas e na for

ma indireta, para fertilizantes, Já no caso de madeira, a inclusão da fase agrícola não altera muito o valor numérico dos indicadores.

O argumento levantado a favor da madeira e contra a cana-de-açúcar é que esta cultura necessita de terras ricas em nutrientes. Isto significa ocupar solo propício à cultura de alimentos para fins energéticos. A cultura da madeira, por sua vez, pode ser feita em solos mais pobres.

A tabela IX mostra as quantidades de macronutrientes retirados do solo pelas culturas de cana-de-açúcar, de E. saligna e de Pinus caribaea hondurensis. Esta tabela também mostra o consumo de macronutrientes por litro de etanol obtido, a partir de cada matéria prima. O consumo de nutrientes pela cana é, em média, 4 vezes maior do que o consumo efetuado pelas madeiras sendo o consumo do pinho inferior ao do eucalipto. Em contra partida, a produção de etanol de madeira, na sua fase de hidrólise, consome cerca de 160 gramas de enxofre (na forma de H_2SO_4) e 180 gramas de cálcio (na forma de $CaCO_3$ ou $Ca(OH)_2$) por litro de etanol produzido, gasto este que não tem paralelo quando da produção de etanol de cana-de-açúcar. Isto mostra que, do ponto de vista do gasto de recursos minerais para nutrientes, a madeira é mais econômica, e do ponto de vista do gasto de enxofre e cálcio a cana-de-açúcar é mais econômica.

A PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE REFLORESTAMENTOS BRASILEIROS

A partir do conjunto de trabalhos estudados, podemos tecer algumas considerações a respeito da produção de etanol a partir de duas madeiras brasileiras que são mais usadas para reflorestamento: Pinus sp. e Eucaliptus sp.

Partiremos do princípio de que o mesmo rendimento de hidró-

lise (% transformação de hexoses potenciais em açúcares) pode ser alcançado para as duas madeiras, ou seja, 70% das hexoses potenciais podem ser efetivamente extraídas. Este rendimento foi o obtido para o abeto da Suíça em 1956, na fábrica suíça⁴ e é o atualmente obtido na União Soviética⁶ (ver tabela I).

Supusemos os rendimentos de fermentação e destilação iguais a 97%, por serem os melhores rendimentos na mesma fábrica suíça citada anteriormente⁴. Com isto, a produção de álcool por tonelada de madeira seca hidrolizada será de 200 litros para o eucalipto e 275 litros para o pinho. O eucalipto contém 42% de hexoses potenciais na madeira seca e o pinho contém 58%.¹⁸

Podemos recalcular todos os indicadores para as madeiras brasileiras. Para isto, usaremos os valores médios dos gastos de energia por tonelada de madeira seca hidrolizada, apresentados na tabela V, exceto no caso da energia na forma de vapor de água, onde usaremos o valor de 3200 kg de vapor/ton de madeira seca hidrolizada ($1,73 \times 10^6$ kcal), sugerido por Wettstein⁴. Lembramos que a fábrica suíça operava, até 1956, com 4200 kg de vapor/ton. de madeira seca hidrolizada (ver tabela II).

A tabela X mostra os indicadores do balanço energético para a hidrólise de pinho e eucalipto e também para o etanol a partir de cana-de-açúcar. A explicação de como estes indicadores são construídos está no item Indicadores.

A comparação dos dados da tabela X com aqueles da tabela VIII, nos permite observar que os indicadores para o eucalipto são semelhantes àqueles para as fábricas suíça e soviética, enquanto que os indicadores para o pinho são melhores. Este fato é reflexo da possibilidade de se obter 275 litros de etanol por tonelada de madeira seca, no caso do pinho e 200 litros, no caso do eucalipto. Es

tes dados reforçam a necessidade de se hidrolisar madeiras com alto conteúdo de hexoses potenciais, como é o caso do pinho.

Para que o primeiro indicador calculado alcance a performance da cana-de-açúcar, teríamos de conseguir uma redução do consumo de vapor d'água de 3200 kg vapor/ton. de madeira seca hidrolisada para 2250 kg vapor/ton. no caso do pinho ou 1350 kg vapor/ton. no caso do eucalipto. Isto significa conseguir uma redução de até 58% no gasto de vapor que se espera conseguir ou uma redução de até 68% no gasto de vapor efetuado hoje em dia nas fábricas soviéticas, que é de 4200 kg vapor/ton. de madeira seca hidrolisada.

Com os dados apresentados abaixo, é possível estimar, para o pinho e eucalipto, as necessidades em madeira e hectares plantados para suprir a operação de uma fábrica de 100.000 litros de etanol por dia, funcionando 330 dias ao ano. Isto é mostrado na tabela XI. Assumimos nos cálculos desta tabela que:

- a) parte do calor necessário para se obter o vapor de água é obtido por queima de lignina. Para cada tonelada de madeira hidrolisada, a queima da respectiva lignina fornece $0,80 \times 10^6$ kcal.¹⁹
- b) o calor remanescente necessário ($1,73 \times 10^6 - 0,80 \times 10^6 = 0,93 \times 10^6$ kcal) é obtido por queima de lenha. O calor de combustão da lenha é 4100 kcal/kg de matéria seca¹¹ e o rendimento da caldeira é 65%¹². Desta forma, para se obter $0,93 \times 10^6$ kcal são necessárias 0,34 toneladas de madeira seca.
- c) a produtividade, em madeira seca, é de 13,2 ton./ha.ano, para o pinho, e 16,5 ton./ha.ano para o eucalipto²⁰. No entanto, consideramos que cerca de 10% desta produtividade é for-

necida pela copa de árvore, que julgamos necessário ficar no solo para o retorno de nutrientes. Assim, assumimos a produtividade efetiva em 12 ton./ha.ano, para o pinho e 15 ton./ha.ano, para o eucalípto.

Devido ao maior rendimento do pinho, em litros de etanol por tonelada seca de madeira hidrolisada, a quantidade diária de pinho cortado é 27% menor que a de eucalípto; no entanto, devido às produtividades, a área plantada total necessária de pinho é apenas 10% menor do que a área necessária para o eucalípto.

CONCLUSÕES:

Os indicadores apresentados favorecem à produção de álcool e tílico a partir da cana-de-açúcar, seja do ponto de vista do balanço energético, seja do ponto de vista do gasto de produtos químicos. A cana-de-açúcar nos fornece uma melhor perspectiva, sendo mais econômica no gasto de energia e recursos minerais. No entanto, como foi mostrado neste trabalho, a cana-de-açúcar por necessitar de terras férteis, desloca cultura de alimentos. Além disso, sua cultura sazonal cria sérios problemas sociais quanto a mão de obra empregada.

A utilização da hidrólise ácida de madeira como um método competitivo no mercado brasileiro, a nosso ver, terá que se vincular a dois aspectos: à exploração dos subprodutos da hidrólise ácida (ver figura 1) e ao desenvolvimento de processos que minimizem o gasto de energia para a produção do etanol. Essa minimização se vincula ao desenvolvimento de pré-tratamentos da madeira que permitam diminuir o grau de cristalinidade da celulose, viabilizando uma hidrólise ácida sob condições amenas.

Também o uso dos subprodutos da hidrólise requer um estudo e

uma discussão sobre seu uso no mercado, assim como sobre os fatores envolvidos na sua recuperação após a hidrólise.

Quanto à comparação entre os processos industriais suíço e soviético, estamos convencidos de não haver diferenças significativas entre os dois, sendo que qualquer preferência deverá se basear em outras considerações que não as provenientes do balanço energético.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a gentileza do Prof. Fábio Poggiani que nos forneceu informações preciosas para a realização do trabalho.

E agradecemos ao Vito R. Vanin, que discutiu conosco aspectos do trabalho.

REFERÊNCIAS E NOTAS

- 1) Helene, M.E.M., Graça, G.M.G. e Vanin, V.R., "Madeira como fonte de energia - etanol a partir de celulose", Ciência e Cultura , 32(7), 807-815 (1980).
- 2) Wenzl, H.F., "The Chemical Technology of Wood", Academic Press, New York, 1970, cap. IV, p. 157-252.
- 3) Cowling, E.B., "Physical and Chemical Constraints in the Hydrolysis of Cellulose and Lignocellulosic Materials". Biotechnol. and Bioeng. Symposium nº 5, John Willey and Sons Inc. 1975, p. 163-181.
- 4) Wettstein, P. e De Vos, J., "The net energy balance of ethanol production from wood", Trabalho apresentado no 4º Simpósio Internacional sobre Tecnologia dos Álcoois como Combustível, outubro de 1980, Guarujá, São Paulo, Brasil.
- 5) "Preliminary Study for the Production of Ethanol by Wood Saccharification for Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, IBDF", Inventa Project nº - BR 6612V, Setembro de 1979.
- 6) "Produção de Combustíveis Líquidos a partir de Madeira". Comissão Técnica para o Desenvolvimento de Fontes Alternativas de Energia a partir do Aproveitamento de Biomassa Florestal, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, IBDF, 1979.
- 7) Vanin, V.R.; Graça, G.M.G. e Goldemberg, J.; "Relatório sobre Obtenção de Coeficientes de Energia", Convênio CESP - IFUSP , 1980, não publicado.

- 8) Estocagem e moagem são comuns aos dois processos. E a partir do momento em que a hidrólise e a neutralização foram efetuadas , todo o equipamento para fermentação e destilação é comum. A diferença encontra-se entre o equipamento de hidrólise da madeira e o equipamento de extração do caldo da cana-de-açúcar.
- 9) Moreira, J.R., Vanin, V.R. e Goldemberg, J., "Energy Balance for the Production of Ethyl and Methyl Alcohol", Workshop on Fermentation Alcohol for use as Fuel and Chemical Feedstock in Developing Countries, Viena, Austria, 26-30 de março de 1979; Preprint IFUSP/ P-165, 1979.
- 10) Poggiani, F. "Florestas para fins energéticos e ciclagem de nutrientes", Anais do Seminário sobre Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais, 17-18 junho, 1980, IPEF - série Técnica, 1 (2), pág. D1 - D11 (1980), Piracicaba, E. São Paulo.
- 11) Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia, 1978.
- 12) Brown, R.I., "O Consumo de Madeira no Brasil", Preprint IFUSP/ P-222, 1980. (ver apêndice 1).
- 13) Orlando Fº, J., Haag, H.P. e Zambello Jr., E., "Crescimento e absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar, variedade CB14 - 76, em função da idade, em solos do Estado de São Paulo", Boletim Técnico Planalsucar, 2 (1): 3 - 127 (1980).

A produção média para 3 tipos de solo após 16 meses, em matéria seca é 34,3 ton. de colmo/ha e 12,8 ton. de folhas/ha, ou seja, 47,1 ton. cana/ha. Estes dados referem-se ao primeiro corte da cana-de-açúcar. Como apresentado na ref. 14, a cana sofre 3

cortes em 4 anos de ocupação da terra com 103, 62 e 50 toneladas de colmo úmido (72-76% de água) por hectare o que perfaz 54 ton. colmo úmido/ha.ano. Assumimos a relação de matéria obtida nos cortes sucessivos da produção da ref. 14 para os dados desta referência (Orlando Fº., J. et al), o que fornece 24,6 ton. cana seca/ha.ano. Assumimos também que os nutrientes são retirados do solo de modo ponderal à matéria seca obtida. As folhas são queimadas e com elas se perde grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes. O percentual de macronutrientes nas folhas é: N = 40%; P = 40%; K = 58% ; Ca = 46% e Mg = 32%. Os dados da tabela IX referem-se à soma dos macronutrientes retirados do solo pelo colmo e folhas.

- 14) Silva, J.G., Serra, G.E., Moreira, J.R., Gonçalves, J.C. e Goldemberg, J., "Energy Balance for Ethyl Alcohol Production from Crops". Science, 201 (4359), 903-906 (1978).

São obtidos 66 litros de etanol a partir de 1 tonelada de colmo de cana-de-açúcar úmido.

- 15) Serra, G.E., Goldemberg, J., Carvalho, C.M. e Moreira, J.R. , "The Energetics of Alternative Biomass Sources for Ethanol production in Brazil", Trabalho apresentado no "Thirdl International Symposium of Alcohol Fuels Technology", California, USA , 1979; Preprint P-171, IFUSP, 1979.

O teor de água na cana-de-açúcar varia entre 72-76%. Para os dados da tabela IX, usamos o teor de água no colmo igual a 74% .

- 16) Poggiani, F., Deptº. Silvicultura, ESALQ/USP, dados não publicados. A produção de 1300 árvores/ha, com 8 anos de idade é 132 ton. de matéria seca, o que equivale a 16,5 ton/ha. ano. A

copa (ramos e folhas) perfazem cerca de 10% da árvore e contém 30% do N; 24% do P; 22% do K; 21% do Ca e 28% do Mg. A partir de 1 tonelada de eucalipto é possível obter 200ℓ de etanol (ver página 9). A quantidade de nutrientes retirados do solo por litro de etanol foi obtida a partir da quantidade de nutrientes por 1 tonelada seca de tronco (N = 1,5kg; P = 0,20kg; K = 1,4kg; Ca = 1,5kg e Mg = 0,30kg).

- 17) Referência 10. A produção de 1000 árvores/ha, com 14 anos de idade é 217 toneladas de matéria seca, o que perfaz 15,5 ton/ha. ano. A copa constitui 14% da matéria seca e contém 40% dos macronutrientes. A partir de 1 tonelada de pinho é possível obter 275ℓ etanol (ver página 9). A quantidade de macronutrientes retirados do solo por litro de etanol foi obtida a partir da quantidade de nutrientes retirada por 1 tonelada seca de tronco (2,75kg de macronutrientes/ton. seca de tronco).
- 18) Informação cedida pelo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, IBDF.
- 19) O conteúdo de lignina na madeira seca é cerca de 30% e o calor de combustão é por volta de 6000kcal/kg. As fábricas soviéticas, que consomem 4800kg de vapor por tonelada de madeira seca hidrolisado, obtêm 25% desta energia por queima de lignina e os soviéticos afirmam que com melhores condições, pode-se chegar a 30% (30% de 4800kg de vapor = $0,78 \times 10^6$ kcal)⁶. Os suíços⁶ afirmam que 50% do vapor de água necessário para processar 1 tonelada de madeira poderia ser obtido por queima da lignina nesta tonelada, (50% de 3200kg de vapor = $0,86 \times 10^6$ kcal). Também os suíços até 1956 gastavam 4200kg de vapor por tonelada de abeto suíço processada⁴. Cerca de 1/3 deste calor era

obtido a partir da lignina⁶, ou seja, 0,76 x 10⁶ kcal. Assumi-
mos o calor obtido para a queima da lignina obtida a partir de
1 tonelada de madeira seca hidrolisada como sendo a média dos
3 valores acima (0,80 x 10⁶ kcal).

- 20) A referência 10 mostra que a produtividade de uma plantação de Eucaliptus saligna, com 8 anos de idade e 1300 árvores por hec-
tare é de 16,5 ton/ha. ano. Como citado na referência 10, Cas-
tro e Poggiani (1979) mostram que a fitomassa arbórea de Pinus
oocarpa, com 8 anos de idade, corresponde a 106 toneladas por
hectare, numa plantação com densidade de 1000 árvores por hec-
tare. Isso corresponde à produtividade, em matéria seca de
13,2 ton/ha. ano.
- 21) Sadir, R. e Papini, R., "Industrialização dos resíduos celuló-
sicos; obtenção de álcool etílico ou etanol". Coletânea do
ITAL, Instituto de Tecnologia de Alimentos de Campinas, SP. ,
p. 397 - 433 (1965/66).
- 22) Perrone, J.D., "Os processos hidrolíticos no aproveitamento dos
recursos renováveis", Instituto Nacional de Tecnologia, MIC ,
nov. 1976.

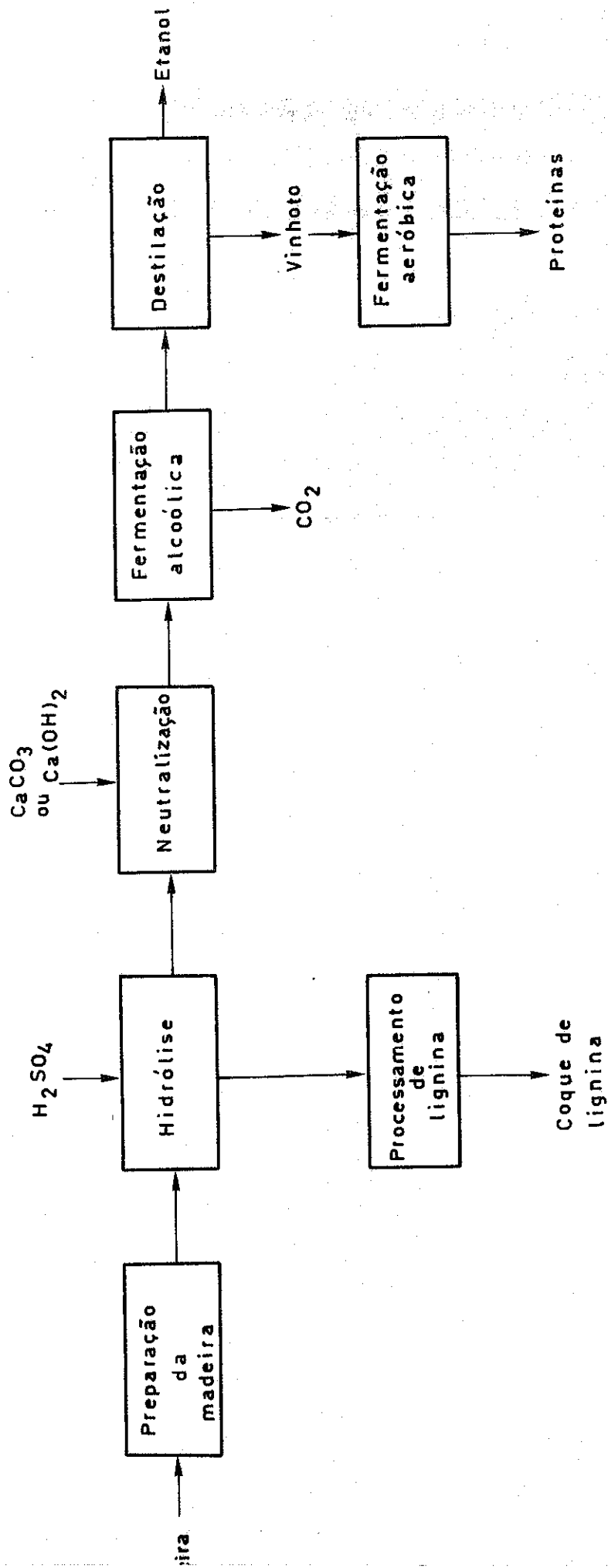


Fig. 1 - Esquema do processo de hidrólise ácida da madeira.

TABELA I

Principais características dos processos de hidrólise ácida da madeira

	Suíça ⁽⁴⁾	União Soviética ⁽⁶⁾
capacidade de operação (l de etanol/dia)	33.000	100.000
madeira usada	Abeto da Suíça	abeto da Sibéria
% em peso seco de hexose potencial na madeira	54	47
rendimento de hidrólise (% de conversão de hexoses em açúcares fermentescíveis)	69	~ 68
rendimento da fermentação (%)	97	90*
eficiência da destilação (%)	97	95*
produção de etanol (l/ton de madeira seca hidro- lisada)	244	185

* valor estimado

TABELA II

Insumos para operação das fábricas de etanol
(por tonelada de madeira seca hidrolizada)

	Suiça [*]	União Soviética ⁽⁶⁾
energia elétrica (kw.h)	63,8 ⁽⁵⁾	55,5
vapor d'água (kg)	4.200 ⁽⁴⁾	4.800
H ₂ SO ₄ (kg)	98,6 ⁽⁵⁾	87,0
neutralizador (kg)	107,0 ⁽⁵⁾ CaCO ₃	59,2 Ca(OH) ₂

* No artigo⁴ que descreve a fábrica em operação até 1956 não existem dados de consumo de ácido sulfúrico, neutralizador ou energia elétrica, portanto assumimos o consumo do projeto da Inventa Ems Group of Industries.⁵

TABELA III

Coeficientes de energia⁽⁷⁾ para ácido e neutralizadores

	H ₂ SO ₄	CaCO ₃	Ca(OH) ₂
Coeficientes de energia kcal/kg	1000	3170	4680

TABELA IV

Custo e duração das fábricas de etanol da madeira⁽⁶⁾

	Suíça	União Soviética
preço milhões US\$ de '79	27	20 a 30
tempo de reposição total da fábrica (anos)	20	20
produtividade (10 ³ l/dia)	150	130

TABELA V

Gastos de energia para obtenção de etanol por tonelada de madeira seca hidrolisada (10^3 kcal)

	Suíça		União Soviética	
	(10^3 kcal)	%	(10^3 kcal)	%
<u>Operação da fábrica:</u>				
energia elétrica	55	2	48	2
vapor d'água	2270	81	2590	85
H ₂ SO ₄	99	16	87	12
neutralizador	339		277	
<u>Bens de Capital</u>	40	1	34-51	1
<u>fase agrícola</u>	-	~ 1%	-	~ 1%
<u>TOTAL</u>	~ 2803	100	~ 3044	100

TABELA VI

Madeira necessária para suprir a totalidade da energia gasta em forma de vapor d'água por tonelada de madeira seca hidrolisada

	Suíça	União Soviética
quantidade de madeira (tonelada seca)	0,85	0,97

TABELA VII

Porcentagem em energia de derivados de petróleo nos insumos

	%
energia elétrica	7,6
produtos químicos	47
fase agrícola	87
bens de capital	31

TABELA VIII

Indicadores para Balanço Energético

	Suíço	Soviético	cana-de-açúcar
razão entre a energia contida no etanol	0,44	0,31	0,94
e a energia total gasta	0,44*	0,30*	0,80*
razão entre a energia contida no etanol	2,31	2,06	16,5
e a energia externa gasta	2,19*	1,94*	4,04*
razão entre a energia contida no etanol	5,55	5,00	63,2
e a energia gasta proveniente do petróleo	4,96*	4,39*	5,6*

* Estes números incluem os gastos de energia na fase agrícola

TABELA IX

Quantidade de macronutrientes retirados do solo para diferentes culturas (cana-de-açúcar^{13,14,15} ; Eucaliptus saligna¹⁶ e Pinus caribaea hondurensis¹⁷)

	kg/ha.ano		g/ℓ.etanol		kg/ton matéria seca				
	cana	eucalipto	pinus	cana	eucalipto	pinus			
N	95,1	31,4 (22,0)	-	21,0	7,5	-	3,88	1,9 (1,3)	-
P	10,7	3,85 (2,92)	-	2,65	1,0	-	0,49	0,23 (0,18)	-
K	94,3	26,2 (20,5)	-	20,8	7,0	-	3,84	1,6 (1,2)	-
Ca	67,3	27,7 (22,0)	-	14,8	7,5	-	2,74	1,7 (1,3)	-
Mg	31,9	6,06 (4,39)	-	7,03	1,5	-	1,30	0,37 (0,27)	-
TOTAL	299,3	95,21 (71,8)	60,2 (36,3)	66,28	24,5	9,9	12,25	5,80 (4,25)	3,9(2,3)

Os números entre parêntesis referem-se a quantidade de nutrientes retirada do solo por tonelada de madeira seca, quando as folhas e ramos são deixados no solo para a devolução dos macronutrientes.

TABELA X

Indicadores para o Balanço Energético - Estimativas para madeiras brasileiras

	Pinho	Eucalipto	cana-de-açúcar
razão entre a energia contida no etanol e a energia total gasta	0,63 0,62*	0,46 0,45*	0,94 0,80*
razão entre a energia contida no etanol e a energia externa gasta	2,82 2,67*	2,05 1,89*	16,5 4,04*
razão entre a energia contida no etanol e a energia gasta proveniente do petróleo	6,77 6,08*	4,92 4,20*	63,2 5,6*

* Estes números incluem os gastos de energia na fase agrícola

TABELA XI

Necessidade de hectares plantados de madeira e cana-de-açúcar para uma fábrica de 100.000 litros de etanol/dia, operando 330 dias por ano.

	Pinho *	Eucalipto *	cana-de-açúcar **
matéria prima seca (ton /dia)	488	671	425
ha colhidos/dia	5,1	5,6	7,0
etanol obtido (l/ha.ano)	2460	2230	3600
área plantada total necessária (ha)	13.400	14.800	10.000

* Os dados incluem a madeira necessária para queima (para cada tonelada hidrolisada, 0,34 toneladas são queimadas para fornecer calor para o processo).

** Dados calculados a partir da referência 14.