

Cinética da fermentação e balanço de massa da produção de cachaça artesanal

Fermentation kinetics and mass balance of the production of cachaça artesanal

Autores | Authors

✉ **Walter CARVALHO**

Universidade de São Paulo (USP)
Escola de Engenharia de Lorena (EEL)
Departamento de Biotecnologia
Estrada Municipal do Campinho, s/n
Caixa Postal: 116
CEP: 12602-810
Lorena/SP – Brasil
e-mail: carvalho@debiq.eel.usp.br

Larissa CANILHA

Universidade de São Paulo (USP)
Escola de Engenharia de Lorena (EEL)
Departamento de Biotecnologia
e-mail: larissa@debiq.eel.usp.br

João Batista de ALMEIDA e SILVA

Universidade de São Paulo (USP)
Escola de Engenharia de Lorena (EEL)
Departamento de Biotecnologia
e-mail: joabatista@debiq.eel.usp.br

■ Resumo

O presente trabalho descreve os resultados obtidos em uma aula prática da disciplina Tecnologia de Bebidas Fermentadas e Destiladas, ministrada para graduandos em Engenharia Bioquímica na Escola de Engenharia de Lorena. Como forma de demonstrar, na prática, conceitos e métodos envolvidos na fermentação e destilação de bebidas alcoólicas, propôs-se aos alunos produzir aguardente artesanal a partir de caldo de cana-de-açúcar. Inicialmente, 5 dúzias de cana (139 kg) foram submetidas à moagem, gerando 52 L de caldo com 21 °Brix. Após a diluição do teor de sólidos solúveis para 15 °Brix, o mosto (73 L) foi transferido para uma dorna de aço inox (100 L) e inoculado com 365 g de fermento prensado, resultando em concentração inicial de células igual a 5×10^7 cels.mL⁻¹. A fermentação foi conduzida em temperatura ambiente e, ao final de 114 h, a atenuação do mosto chegou a aproximadamente 75%. Houve crescimento celular intenso durante as primeiras 12 h de fermentação, com velocidades específicas de multiplicação iguais a 0,28 h⁻¹ (0-4 h) e 0,09 h⁻¹ (4-12 h). Entre 12 e 114 h de fermentação, porém, a concentração de células suspensas no meio se comportou de maneira irregular, variando entre 1,3 e $3,1 \times 10^8$ cels.mL⁻¹. Considerando-se o etanol como produto de interesse, obteve-se: produção de 47,4 g.L⁻¹, produtividade de 0,42 g.L⁻¹.h⁻¹ e rendimento de 0,41 g.g⁻¹ (80,4% de eficiência). O vinho obtido (teor alcoólico de 6,0 °GL) foi submetido à destilação em um alambique de cobre (25 L), em 4 bateladas (17,5 L cada). Desprezaram-se 10% do volume teórico de aguardente como destilado de cabeça (cerca de 0,2 L em cada batelada). Em seguida, recolheu-se o destilado de coração até a graduação alcoólica atingir um valor em torno de 40 °GL (cerca de 2,5 L em cada batelada). Por fim, o aquecimento do alambique foi suspenso e a vinhaça descartada. O rendimento global do processo foi de 72 L de aguardente de coração (40,5 °GL) por tonelada de cana processada.

Palavras-chave: Cachaça; Fermentação; Destilação; Cinética; Balanço de massa.

■ Summary

This manuscript describes the results obtained in a practical course of the discipline Technology of Fermented and Distilled Beverages ministered to undergraduate students majoring in Biochemical Engineering at the Engineering College of Lorena. As a way to demonstrate concepts and methods involved in the fermentation and distillation of alcoholic beverages, it was proposed to the students to produce cachaça artesanal from the sugarcane juice. Initially, 5 dozens of cane (139 kg) were submitted to crushing, generating 52 L of juice (21 °Brix). After dilution to 15 °Brix with drinking water, the juice (73 L) was transferred to a 100-L stainless steel fermenter and inoculated with 365 g of pressed baker's yeast, resulting in an initial cell concentration of 5×10^7 cells.mL⁻¹. The fermentation was carried out under ambient temperature and, after 114 h, the consumption of soluble solids reached approximately 75%. The cell growth was intense during the first 12 h of fermentation, with specific growth rates of 0.28 h⁻¹ (0-4 h) and 0.09 h⁻¹ (4-12 h). After this period, the concentration of suspended cells in the medium behaved in an irregular fashion, varying between 1.3 and 3.1×10^8 cells.mL⁻¹. Considering the ethanol as product of interest, a production of 47.4 g.L⁻¹, a productivity of 0.42 g.L⁻¹.h⁻¹ and a yield of 0.41 g.g⁻¹ (efficiency of 80.4%) were achieved in the fermentation. The wine thus obtained (6.0 °GL) was submitted to distillation in a 25-L copper still (4 batches). In each batch, the still was filled with 17.5 L of wine, the heating was turned on, and the first 0.2 L of distillate was discarded as head's distillate. The heart's distillate was then collected down to an alcoholic content of 40 °GL (approximately 2.5 L of distillate produced in each batch). The run was ended up by turning the heating off and appropriately discarding the vinasse. Overall, the yield of the process was of 72 L of heart's cachaça (40.5 °GL) per ton of sugarcane processed.

Key words: *Cachaça; Fermentation; Distillation; Kinetics; Mass balance.*

Cinética da fermentação e balanço de massa da produção de cachaça artesanal

CARVALHO, W. et al.

1 Introdução

A história da cachaça se confunde com a própria história do Brasil. A sua produção teve início no século XVI, quando se observou que a borra (cachaza) separada do processo de concentração da garapa para a produção de açúcar, colocada em recipiente e deixada de um dia para o outro, fermentava produzindo um líquido com cheiro e sabor diferente. Submetido à destilação, o líquido gerava uma bebida transparente, brilhante e ardente. Considerando-se que parecia com água, optou-se por chamá-la "água ardente". Outro nome que lhe foi atribuído foi "cachaça", por ser originada da borra ou cachaza (LIMA, 2001).

Até o fim da 2ª Guerra (1939-1945), o plantio e processamento da cana-de-açúcar e a comercialização da aguardente eram realizados por engenhos de pequena capacidade. A quantidade consumida era menor que a produzida, sendo o excedente armazenado em tonéis de madeira. Após a 2ª Guerra, a população aumentou muito e também o consumo, que passou a exigir maior volume de produção e, conseqüentemente, ampliação das lavouras e das capacidades fabris (LIMA, 1999).

Atualmente, são comuns as grandes destilarias, com capacidades de produção que podem chegar a 20.000 L.h⁻¹, e as engarrafadoras autônomas, que detêm marcas comerciais conhecidas em todo o País e possuem capacidade de engarrafar até 400.000 garrafas de 600 mL por dia (LIMA, 1999; LIMA, 2001). Estima-se que a produção anual seja superior a 1,3 bilhões de litros, o que coloca a bebida como a segunda mais vendida no Brasil, perdendo apenas para a cerveja (MALTA, 2006). Embora a produção seja consumida quase que totalmente no mercado interno, há potencial para aumento significativo nas exportações, pois é crescente a aceitação da bebida no exterior (ESTANISLAU et al., 2002; MIRANDA et al., 2007).

Do ponto de vista da legislação brasileira, a aguardente de cana, popularmente conhecida como pinga, deve conter entre 38 e 54% de álcool (expresso em volume). É constituída de água e etanol em grandes proporções, além de vários outros componentes (ácidos orgânicos, ésteres, aldeídos e alcoóis superiores) produzidos em pequenas quantidades durante a fermentação. Estes componentes minoritários, porém extremamente diversificados, são os principais responsáveis pelo sabor e aroma da bebida (DATO et al., 2005).

A produção de cachaça segue operações simples. Entretanto, sabe-se que o desconhecimento da ciência envolvida na produção desta bebida limita a quantidade e a qualidade do produto disponibilizado no mercado por pequenos produtores, sendo este um dos principais entraves para a exportação de grandes quantidades do produto (MIRANDA et al., 2007).

No presente trabalho, descrevemos a metodologia utilizada para a produção de cachaça artesanal em uma aula prática ministrada na Escola de Engenharia de Lorena. Este experimento foi proposto a estudantes de graduação com o objetivo de demonstrar, na prática, conceitos e métodos envolvidos na fermentação e destilação de bebidas alcoólicas. Os resultados obtidos foram analisados buscando-se explorar a cinética da fermentação e o balanço de massa do processo, o que permitiu aos alunos aplicar conceitos abordados em outras disciplinas do curso de Engenharia Bioquímica.

2 Material e métodos

A Figura 1 apresenta o fluxograma utilizado para a produção da cachaça artesanal, conduzida na Planta Piloto de Bebidas da Escola de Engenharia de Lorena. A cana-de-açúcar foi adquirida de um pequeno produtor local. Cinco dúzias de colmos maduros foram colhidas diretamente na lavoura, sendo as folhas e os ponteiros descartados. Os colmos foram então transportados até a Escola de Engenharia de Lorena e lavados para remoção de terra e sujidades. Após pesagem (139 kg), foram

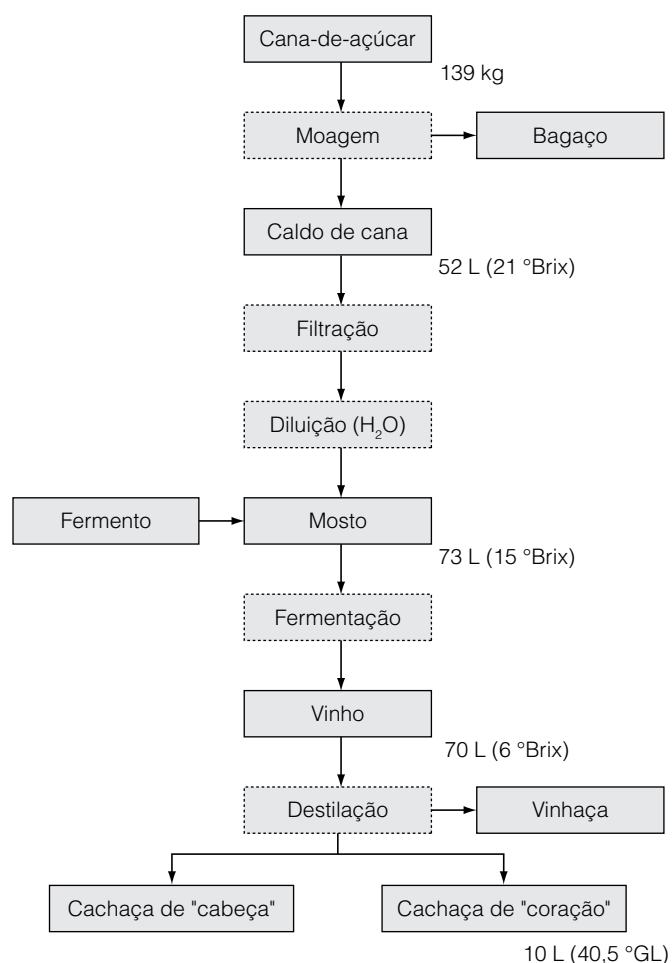


Figura 1. Fluxograma do processo de produção da cachaça artesanal.

Cinética da fermentação e balanço de massa da produção de cachaça artesanal

CARVALHO, W. et al.

submetidos à moagem em um terno de moenda e o suco obtido foi filtrado em um coador plástico. A concentração de sólidos solúveis no suco filtrado (52 L) foi de 21 °Brix. Previamente à inoculação, o suco foi diluído com 21 L de água potável em uma dorna de aço inox com fundo cônico (volume total de 100 L). A fermentação foi iniciada inoculando-se os 73 L de mosto (15 °Brix) com 365 g de fermento de panificação prensado (Fleischmann), o que resultou em uma concentração inicial de células igual a 5×10^7 cels.mL⁻¹. A fermentação foi conduzida em temperatura ambiente por um período de 114 h. Ao final deste período, a levedura decantada no fundo da dorna foi descartada e o vinho obtido (70 L, com graduação alcoólica de 6 °GL) foi submetido à destilação em um alambique de cobre (volume total de 25 L), em 4 bateladas sucessivas. Em cada batelada, 17,5 L de vinho foram transferidos para o alambique e o aquecimento da caldeira (com fogão a gás) foi iniciado. Do volume teórico de aguardente, os 10% iniciais foram descartados como destilado “de cabeça” (cerca de 0,2 L em cada batelada). Controlando-se o aquecimento para o alambique não “vomitar”, a destilação foi conduzida lentamente até a graduação alcoólica da aguardente “de coração” apresentar um valor em torno de 40 °GL (cerca de 2,5 L em cada batelada). Por fim, o aquecimento do alambique foi suspenso e a vinhaça descartada.

As fermentações foram acompanhadas determinando-se a temperatura do mosto em fermentação (com um termômetro convencional) e analisando-se amostras retiradas periodicamente quanto ao consumo de açúcares e ao crescimento celular. As amostras foram inicialmente centrifugadas a 4.000 rpm por 20 min. Os sobrenadantes foram utilizados para a determinação do teor de sólidos solúveis (por leitura direta em refratômetro de °Brix) e do pH (por leitura direta em pHmetro – Ecomet P25). Os precipitados foram utilizados para a quantificação do crescimento celular (por contagem em câmara de Neubauer) após ressuspensão e diluição em água destilada.

O cálculo do teor de etanol e a concentração de células suspensas no mosto em fermentação foram determinados de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente. O volume teórico de aguardente descartado como destilado “de cabeça” foi calculado empregando-se a Equação 3 (SMILEY, 1999).

$$E = \frac{(B_i - B_f) \times 4}{7,4} \quad (1)$$

$$C = N \times 5E04 \times FD \quad (2)$$

$$A = \frac{V_{\text{vinho}} \times GA_{\text{vinho}}}{45} \quad (3)$$

onde E: Graduação alcoólica (°GL); B_i: Brix inicial (°Brix); B_f: Brix final (°Brix); C: Concentração celular (cels.mL⁻¹); N: Número total de células em 5 campos da câmara (cels); FD: Fator de diluição (-); A: Volume teórico de aguardente a 45 °GL (L); V_{vinho}: Volume de vinho (L); GA_{vinho}: Graduação alcoólica do vinho (°GL).

A graduação alcoólica do destilado “de coração” foi determinada por densimetria, utilizando-se um alcoômetro de Gay-Lussac calibrado a 20 °C. Após a medida, o teor de etanol foi corrigido levando-se em consideração a temperatura ambiente no momento da medida.

3 Resultados e discussão

No presente trabalho, procuramos sistematizar as rotinas operacionais e analíticas utilizadas por nós para a produção de cachaça artesanal. A simples adoção de rotinas semelhantes a estas permitiria aos muitos pequenos produtores espalhados por todo o País conhecer o comportamento dos seus sistemas de produção e, assim, aferir rendimentos e produtividades em cada uma das etapas do processo. De posse destes dados, o produtor poderia detectar desvios do comportamento “adequado” em tempo real e, assim, ajustar as condições de operação para minimizar perdas na eficiência de transformação e padronizar a qualidade da bebida.

Conforme já mencionado, a cana foi inicialmente lavada, moída e filtrada. O pH (5,4) e a concentração de sólidos solúveis (21 °Brix) determinados no caldo filtrado foram condizentes com os valores esperados para canas maduras: pH entre 5,4 e 5,8 e concentração de sólidos solúveis superior a 18 °Brix (LIMA, 1999).

Previamente à inoculação, o caldo foi diluído com água potável para se ajustar o teor de sólidos solúveis em 15 °Brix. A fermentação foi então iniciada adicionando-se 365 g de fermento prensado ao caldo diluído, em uma dorna de aço inox. A Figura 2 apresenta os perfis de variação de temperatura (entre 24 e 30 °C), decréscimo de pH (de 5,2 para 3,6), consumo de sólidos solúveis (de 15,0 para 4,0 °Brix) e produção de etanol (6,0 °GL), observados durante a fermentação.

A temperatura do mosto em fermentação, embora não controlada, permaneceu próxima aos valores considerados como adequados para a fermentação alcoólica, entre 26 e 28 °C (LIMA, 1999). O pH do meio sofreu uma queda acentuada durante as primeiras 24 h de fermentação (de 5,2 para 3,7), vindo a se estabilizar em torno de 3,5 posteriormente. O consumo progressivo dos açúcares presentes no caldo foi observado durante as primeiras 100 h de fermentação, havendo estagnação em 4 °Brix após este período (atenuação de cerca de 75%). A este consumo de açúcares, correspondeu uma produção de etanol igual a 6,0 °GL.

Cinética da fermentação e balanço de massa da produção de cachaça artesanal

CARVALHO, W. et al.

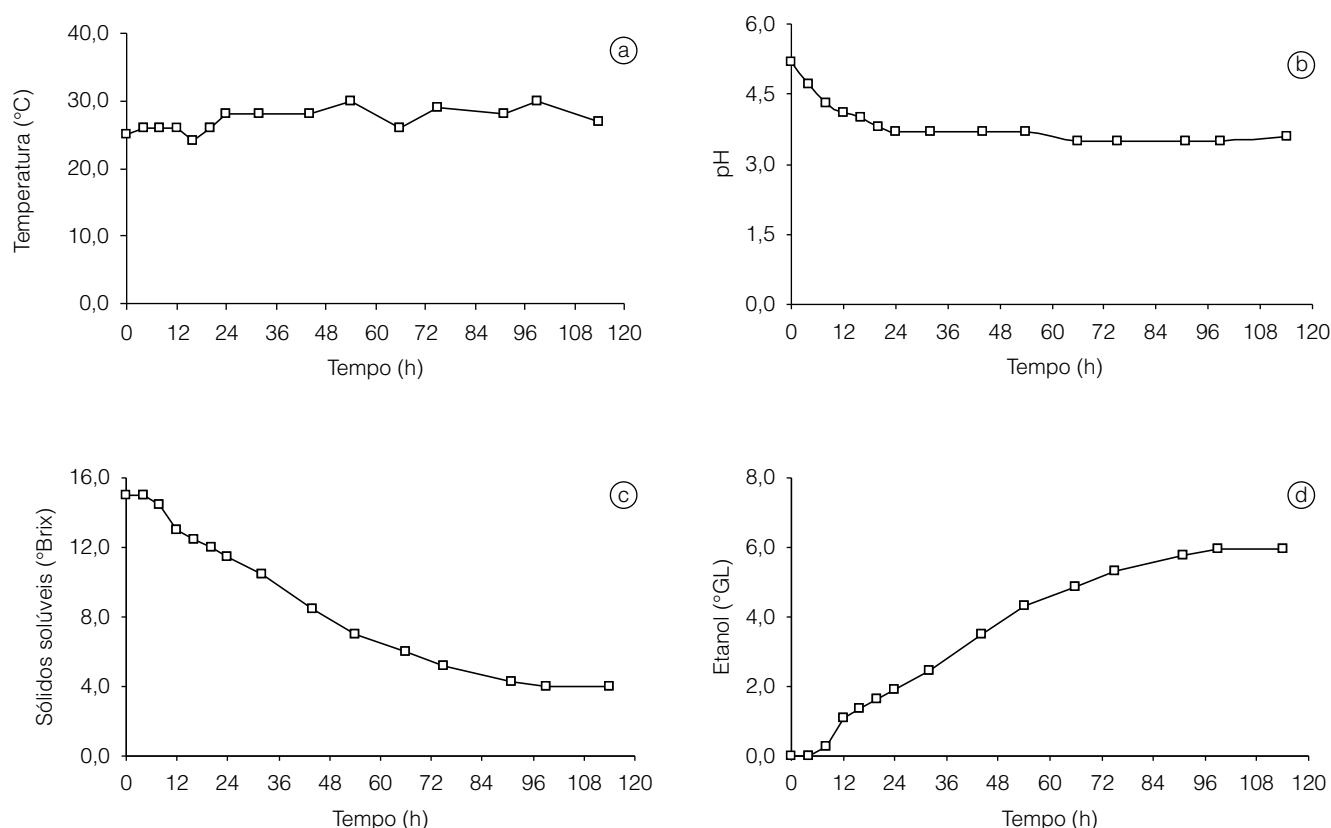


Figura 2. Perfis de variação da temperatura (a), do pH (b) e das concentrações de sólidos solúveis (c) e etanol (d), observados durante a fermentação.

Normalmente, espera-se que a fermentação alcoólica acuse atenuação completa (0 °Brix) em um período de 24 a 36 h (LIMA, 1999). Entretanto, este comportamento não foi observado no presente trabalho. Acredita-se que a utilização de um mosto mais diluído, suplementado com nutrientes extras (vitaminas, sais minerais, etc.) e inoculado com uma maior carga de fermento previamente adaptado ao mosto, contribuiria para se obter um comportamento de fermentação mais próximo do esperado.

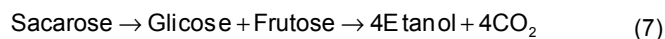
Considerando-se a densidade do etanol ($\rho = 0,79 \text{ g.mL}^{-1}$), pode-se dizer que a produção deste álcool durante a fermentação foi de $47,4 \text{ g.L}^{-1}$ ($6 \text{ °GL} = 60 \text{ mL álcool.L}^{-1} \text{ vinho} = 47,4 \text{ g álcool.L}^{-1} \text{ vinho}$). Como esta produção foi observada após 114 h de fermentação, tem-se que a produtividade foi de $0,42 \text{ g.L}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ($Q_p = 47,4 \text{ g.L}^{-1}/114 \text{ h}$). Convertendo-se o consumo de açúcares de °Brix para g.L^{-1} , chega-se a um fator de rendimento ($Y_{P/S}$) de $0,41 \text{ g.g}^{-1}$ (Equações 4, 5 e 6) (SMILEY, 1999), que representa uma eficiência de fermentação de 80% do valor estequiométrico de $0,51 \text{ g.g}^{-1}$ (Equação 7).

$$\begin{aligned} \rho_{\text{solução}} &= \text{°Brix} \times 0,004 + 1,000 \therefore \\ \rho &= 11,0 \times 0,004 + 1,000 \therefore \rho = 1,044 \text{ g.mL}^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{°Brix} = \frac{g_{\text{açúcares}}}{100 g_{\text{solução}}} \therefore 11,0 \quad (5)$$

$$\text{°Brix} = \frac{11 g_{\text{açúcares}}}{95,8 \text{ mL}_{\text{solução}}} \therefore \Delta S = 114,8 \text{ g.L}^{-1}$$

$$Y_{P/S} = \frac{\Delta P}{\Delta S} \therefore Y_{P/S} = \frac{47,4 \text{ g.L}^{-1}}{114,8 \text{ g.L}^{-1}} \therefore Y_{P/S} = 0,41 \text{ g.g}^{-1} \quad (6)$$



onde: $\rho_{\text{solução}}$: densidade da solução (g.mL^{-1}); °Brix: concentração de sólidos solúveis (°Brix); ΔS : variação da concentração de substratos durante a fermentação (g.L^{-1}); $Y_{P/S}$: fator de conversão de substrato em produto (g.g^{-1}); ΔP : variação da concentração de produtos durante a fermentação (g.L^{-1}).

Conforme pode ser observado na Figura 3a, houve crescimento celular intenso durante as primeiras 12 h de fermentação. Após este período, porém, a concentração de células suspensas no meio se comportou de maneira irregular, variando entre $1,3$ e $3,1 \times 10^8 \text{ cels.mL}^{-1}$.

Considerando-se que a multiplicação celular na fase de crescimento exponencial é descrita pela Equação 8, as velocidades específicas de crescimento

Cinética da fermentação e balanço de massa da produção de cachaça artesanal

CARVALHO, W. et al.

da levedura no início da fermentação foram determinadas por meio dos plots $\ln(X/X_0) \times t$ para os intervalos compreendidos entre 0 e 4 h e entre 4 e 12 h de fermentação (Figuras 3b, c). Os valores de μ_x assim determinados (0,28 e 0,09 h^{-1} , respectivamente) foram próximos àqueles esperados para a levedura *Saccharomyces cerevisiae* (MARTINEZ-PEINADO e VAN UDEN, 1977).

$$\ln X = \ln X_0 + \mu_x \times t \quad (8)$$

onde: X: concentração celular no tempo t (cels.mL⁻¹); X₀: concentração celular inicial (cels.mL⁻¹); μ_x : velocidade específica de crescimento celular (h⁻¹); t: tempo de fermentação (h).

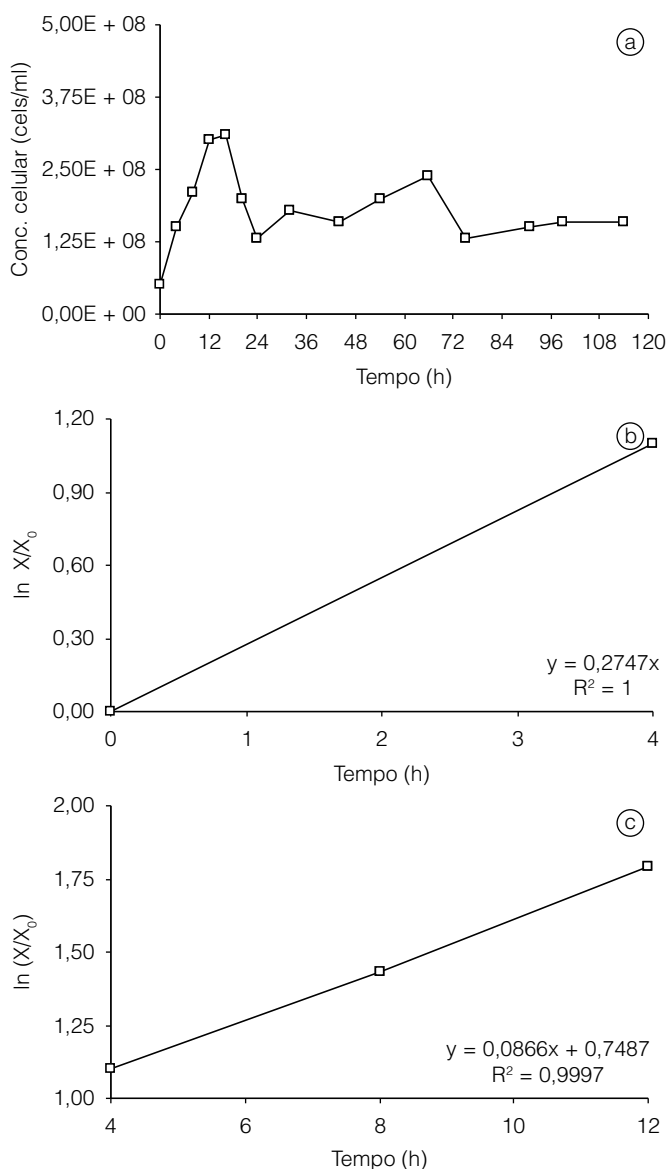


Figura 3. Variação da concentração celular durante a fermentação (a) e plots $\ln(X/X_0) \times t$ utilizados para o cálculo das velocidades específicas de crescimento celular nos intervalos compreendidos entre 0 e 4 h (b) e entre 4 e 12 h de fermentação (c).

Após o descarte das células decantadas no fundo da dorna, o vinho obtido (70 L, graduação alcoólica de 6,0 °GL) foi submetido à destilação em um alambique simples, aquecido por fogo direto. A destilação foi realizada lentamente (controlando-se o aquecimento) para maximizar o rendimento e melhorar o aroma e o gosto do destilado (LIMA, 1999). Conforme ilustrado na Figura 1, foram obtidos 10 L de aguardente de coração (graduação alcoólica de 40,5 °GL) a partir dos 70 L de vinho submetidos à destilação, o que acarretou em eficiência de destilação de cerca de 96% (Equação 9).

$$\eta = \frac{V_{\text{álcool(destilado)}}}{V_{\text{álcool(vinho)}}} \times 100 \therefore$$

$$\eta = \frac{10L_{\text{destilado}} \times \frac{405\text{mL}_{\text{álcool}}}{L_{\text{destilado}}}}{70L_{\text{vinho}} \times \frac{60\text{mL}_{\text{álcool}}}{L_{\text{vinho}}}} \times 100 \therefore \eta = 96,4\% \quad (9)$$

onde: η : eficiência de destilação (%); $V_{\text{álcool(destilado)}}$: volume total de álcool recuperado no destilado (mL); $V_{\text{álcool(vinho)}}$: volume total de álcool contido no vinho (mL).

Considerando-se que os 10 L de aguardente de coração foram obtidos processando-se 139 kg de cana, tem-se que o rendimento global foi de 72 L de aguardente por tonelada de cana esmagada. Este rendimento é bastante utilizado como parâmetro de avaliação do processo por destilarias artesanais. Sob condições otimizadas, esperam-se valores entre 90 e 100 L cachaça/t cana esmagada (LIMA, 1999).

4 Conclusões

O rendimento global do processo de produção de cachaça alcançado no presente trabalho foi cerca de 70% daquele obtido por destilarias artesanais que operam sob condições otimizadas. Os conceitos e metodologias ora apresentados fornecem as diretrizes básicas para que outras condições de processo possam ser sistematicamente avaliadas em aulas práticas futuras. Outrossim, acredita-se que o presente trabalho possa ser utilizado fora das fronteiras acadêmicas como um texto introdutório à ciência envolvida na produção de cachaças artesanais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a assistência técnica dos Srs. José Carlos S. Tavares e Cleber Mateus T. Oliveira e o empenho dos graduandos em Engenharia Bioquímica (TB/2º SEM 2007) para a realização do experimento. Também agradecem o apoio financeiro recebido da FAPESP, da CAPES e do CNPq para o desenvolvimento de projetos de pesquisa, alguns deles relacionados com a temática do presente manuscrito.

Cinética da fermentação e balanço de massa da produção de cachaça artesanal

CARVALHO, W. et al.

Referências

- DATO, M. C. F.; PIZAURO Jr., J. M.; MUTTON, M. J. R. Analysis of the secondary compounds produced by *Saccharomyces cerevisiae* and wild yeast strains during the production of “cachaça”. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 70-74, 2005.
- ESTANISLAU, M. L. L.; CANÇADO Jr., F. L.; PAIVA, B. M. Mercado Atual e potencial da cachaça. **Informe Agropecuário – EPAMIG**, Brasília, v. 23, n. 217, p. 19-24, 2002.
- LIMA, U. A. **Aguardente**: fabricação em pequenas destilarias. 1ª ed. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1999. 187 p.
- LIMA, U. A. Aguardentes. In: AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A. (Eds.). **Biotecnologia Industrial**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2001. Cap. 5, p. 145-182.
- MALTA, H. L. **Estudos de parâmetros de propagação de fermento (*Saccharomyces cerevisiae*) para produção de cachaça de alambique**. 2006. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Faculdade de Farmácia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MARTINEZ-PEINADO, J.; VAN UDEN, N. Isothermic variation of the specific growth rate of *Saccharomyces cerevisiae* in batch culture. **Archives of Microbiology**, Heidelberg, v. 113, n. 3, p. 303-307, 1977.
- MIRANDA, M. B.; MARTINS, N. G. S.; BELLUCO, A. E. S.; HORII, J.; ALCARDE A. R. Qualidade química de cachaças e aguardentes brasileiras. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 4, p. 897-901, 2007.
- SMILEY, I. (Ed.). **Making Pure Corn Whiskey**: a professional guide for amateur and micro-distillers. 1ª ed. Canadian: An Amphora Society Publication, 1999. 103 p.