

# MODELAGEM CINÉTICA DA FERMENTAÇÃO DA CERVEJA

*Kinetic beer fermentation modeling*

## Resumo:

O consumo da cerveja está enraizado aos hábitos de consumo alimentar há séculos, entretanto apenas nos últimos 150 anos sua produção e consumo tornaram-se expressivos entre as bebidas alcoólicas. O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo verificar o efeito da adição de nitrogênio proteico e do pH na fermentação alcóolica da cerveja avaliando o seu comportamento fermentativo em termos de produção de etanol. Foi realizado um planejamento fatorial  $2^2$ , com ponto central, para avaliar o efeito do nitrogênio proteico e do pH na fermentação. A produção de etanol alcançou o ponto máximo do processo fermentativo com valor final de 38,6 g/L. O modelo cinético proposto se ajustou bem aos resultados experimentais podendo ser usado para cervejas do tipo lager

## Abstract:

The consumption of beer has been rooted in food consumption habits for centuries, but only in the last 150 years its production and consumption have become significant among alcoholic beverages. The development of this work had as objective to verify the effect of the addition of protein nitrogen and pH in the alcoholic fermentation of the beer evaluating its fermentative behavior in terms of ethanol production. A factorial design  $2^2$ , with central point, was carried out to evaluate the effect of protein nitrogen and pH on fermentation. Ethanol production reached the peak of the fermentation process with a final value of 38.6 g / L. The proposed kinetic model fitted well to the experimental results and can be used for lager beers.



**Isabelle Cristine Prohmann  
Tschoeke<sup>1</sup>, João Henrique  
Fernandes da Silva<sup>1</sup>, Jorge  
Vinícius Fernandes Lima  
Cavalcanti<sup>2</sup>, Glêce Milene  
Santana Gomes<sup>1</sup>, Thibério Pinho  
Costa Souza<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns; <sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: isabelletschoeke@gmail.com

Contato principal

**Isabelle Cristine Prohmann Tschoeke<sup>1</sup>**



**Palavras chave:** Cerveja, Fermentação, Modelo cinético

**Keywords:** Beer, fermentation, Kinetic Model



## INTRODUÇÃO

O surgimento de bebidas alcólicas fermentadas constitui uma das atividades mais remotas realizadas pelo homem, bem como a produção de cerveja. Sendo uma atividade milenar, existem relatos de produção de cerveja na região da Mesopotâmia e a literatura sugere que tal processo foi introduzido nos hábitos alimentares, em várias civilizações, há mais de 7000 anos (ESTEVINHO, 2015; FREITAS, 2015). Apesar de o consumo da cerveja estar enraizado aos hábitos de consumo alimentar há séculos, apenas nos últimos 150 anos sua produção e consumo tornaram-se expressivos entre as bebidas alcoólicas admitidas na sociedade industrial moderna, encontrando-se, atualmente, globalizados. A participação do Brasil nesse mercado tem chamado a atenção de grandes empresas que atuam no setor, pois, de fato, a produção na China e no Brasil assumiram proporções surpreendentes nas últimas duas décadas (DE FREITAS, 2015). O Brasil produziu 14 bilhões de litros de cerveja em 2014, mantendo-se no terceiro lugar do ranking mundial, atrás apenas da China e Estados Unidos, segundo dados da Kirin Beer University. A produção nacional cresceu a uma taxa média de 5% ao ano, nos últimos dez anos. Segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CEVBRASIL, 2015), esse segmento industrial representa 1,6% do PIB, produzindo 14,1 bilhões de litros ao ano, e responsável por uma taxa de ocupação que atinge 2,2 milhões de empregos diretos e indiretos, chegando a uma massa salarial de, aproximadamente, R\$27 bilhões. A demanda pela cerveja vem crescendo no país, o que sinaliza a possibilidade de maior participação do produto no cenário econômico. Em pesquisa do Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja (BRASIL, 2009) constatou que esse mercado tem tido um crescimento generalizado no país. Com base no histórico de consumo e o constante crescimento do mercado cervejeiro, o estágio tecnológico dessa indústria é considerado maduro e as principais fontes de melhoria estão relacionadas a temas como diminuição do consumo de água e de energia e redução das emissões de CO<sub>2</sub> e de resíduos (BRUNELLI, 2012). Visto a grande importância do setor cervejeiro, estudos avançados relacionados à fermentação e seu rendimento tem sido cada vez mais realizados em centros de pesquisa especializados em bebidas. O uso do método de avaliação cinética de um processo fermentativo tem sido uma ferramenta bastante disseminada (CARNEIRO, 2010). Essa técnica tem como objetivo determinar a taxa de formação de produto (P), consumo de substrato (S), e crescimento celular (X), bem como verificar o efeito de fatores extrínsecos nessas taxas, que são determinantes para a avaliação de um processo fermentativo (MATOS, 2011; VIEGAS, 2003; LIMA; MARCONDES, 2002;). O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo verificar o efeito da adição de nitrogênio proteico e do pH na fermentação alcóolica da cerveja tipo Lager além de propor um modelo cinético de primeira ordem baseado em resultados experimentais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi realizada a moagem de 5,2 kg de malte Pilsen e em seguida, deu-se início a etapa de mosturação, em que foi feito o aquecimento de 12,5 L de água potável até a temperatura de 70,6°C em uma panela (30,0 L), o malte previamente moído foi introduzido e submetido a duas rampas de temperatura até terminar o processo. Na primeira rampa, utilizou-se a temperatura de 64°C por aproximadamente 1 (uma) hora e 20 (vinte) minutos. E na segunda rampa foi utilizada a temperatura de 70°C por 10 (dez) minutos, para inativação das enzimas. Após o término do aquecimento, realizou-se a filtração e posteriormente foi a etapa de Ebulição (fervura) do mosto por 1 (uma) hora, em que foi feita a adição do lúpulo e o mosto foi esterilizado. O lúpulo foi adicionado em dois momentos da fervura, no primeiro foi adicionado 15g no início da fervura (lúpulo de amargor) e no segundo adicionou-se 10g de lúpulo nos 15 minutos finais (lúpulo de aroma). Após a ebulição do mosto, com volume final de 18,0 L, este foi resfriado até a temperatura de 30°C. Finalmente o mosto recebeu o fermento, onde foram adicionados 2 (dois) pacotes de levedura *S. cerevisiae da Fermentis®* (Saflager S-23) de baixa fermentação. Após a inoculação e posterior homogeneização, foi realizada a divisão do mosto padrão em 6 (seis) fermentadores. Cada fermentador recebeu 3,0 L de mosto padronizado, posteriormente foram adicionadas as respectivas quantidades de extrato de levedura (nitrogênio proteico) e ácido fosfórico para correção do pH de acordo com o planejamento experimental. Os sistemas foram conduzidos à primeira fermentação em estufa BOD (12°C/10 dias). Com o fim da primeira fermentação (10º dia), deu-se início a segunda clarificação a baixa temperatura (5°C/7 dias). Durante a fermentação, as leveduras consomem o substrato e produzem etanol e CO<sub>2</sub> conforme mostra a Figura 1.

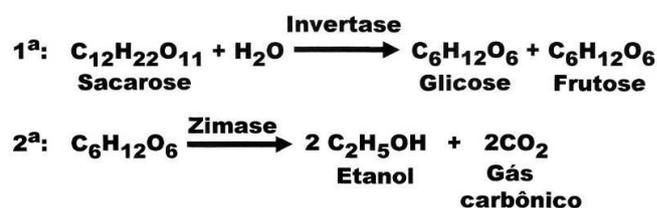


Figura 1. Mecanismo da transformação do açúcar em etanol.

Para avaliar o efeito do nitrogênio proteico e do pH na fermentação, foi realizado um experimento fatorial completo 2<sup>2</sup> com ponto central, levando em consideração os fatores de controle e os níveis dos fatores conforme mostra a Tabela 1 (RODIGUES, 2012). Os tratamentos do planejamento foram avaliados e comparados por meio do teste de Tukey ao nível de 5% no *Software Statistica* versão 10.0.

Tabela 1. Planejamento fatorial com nível máximo, mínimo e ponto central.

Fatores de Controle	Níveis		
	(-)	(0)	(+)
Extrato de Levedura	1,67	2,5	3,33
pH	4	4,5	5

Em seguida foi proposto um modelo cinético de primeira ordem para representar a formação do etanol em função do tempo como mostra a Equação (1):

$$Et(t) = Et_{m\acute{a}x} * (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

Onde:

Et(t) é a produção de etanol (g/L) em função do tempo (h);

Et<sub>máx</sub> é a quantidade máxima de etanol produzida no processo (g/L);

t é o tempo (h);

τ é a constante de tempo do processo (h).

Foi adotado o modelo matemático padrão para sistemas de primeira ordem aplicados ao controle de processos conforme apresentado na literatura específica (SMITH & CORRUIPIO, 2008). O modelo proposto parte de um balanço de massa no qual segue por analogia a concentração de reagente sugerido na própria literatura.

Para a obtenção do ajuste de curva, foi adotado o método dos Mínimos Quadrados. E utilizou-se a ferramenta de ajuste de curva do *Matlab*<sup>®</sup> chamada de *CFTool* com a função *FIT*. Por fim, os dados foram inseridos no simulador *Aspen Plus*<sup>®</sup> V8.8 a fim de obter os resultados da simulação e comparar aos resultados experimentais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após os resultados da simulação realizada seguindo o modelo cinético de primeira ordem, foi possível comparar tanto os resultados experimentais quanto o simulado. A Tabela 2 apresenta os resultados para a produção de etanol referente ao experimento e ao modelo cinético.

Percebe-se que tanto o modelo cinético proposto quanto os resultados do experimento apresentaram uma produção final de etanol na ordem de 40 g/L. A Tabela 3 apresenta o resultado para o planejamento experimental adotado neste trabalho.

Com relação à produção de etanol, o planejamento mostrou que o experimento T4 em que se tem um extrato de levedura de 1,67 g/L trabalhando com um pH de 5,0 apresentou o maior nível de produção de etanol chegando a 38,51 g/L, indicando que o pH tem impacto direto no processo de fermentação, o mesmo pode ser observado no experimento T3. Desta forma, é importante ter o controle do pH no início da fermentação, para garantir a produção.

A Figura 2 mostra o gráfico de Pareto e de superfície para as respostas ao experimento segundo o planejamento fatorial apresentado. Como pode ser visto, o impacto dos fatores na concentração de etanol apresenta uma relação positiva para o pH e negativa para o extrato de levedura, entretanto, a interação entre esses fatores não foi significativa.

Tabela 2. Comparação entre os resultados experimentais e o simulador pelo modelo.

Tempo (h)	Produção de Etanol (g/L) - Experimental	Produção de Etanol (g/L) - Modelo
0	0	0
24	8	9
48	17	16
72	24	23
96	30	28
120	35	32
144	37	35
168	38	38
192	39	40
216	40	42
240	41	43

Tabela 3. Resultado da análise estatística para a produção de etanol.

Ensaio	Extrato de Levedura	pH	Etanol (g/L)
T1	+	-	37,26
T2	-	-	37,71
T3	+	+	38,17
T4	-	+	38,51
T5	0	0	37,66

É possível notar que as variáveis pH, extrato de levedura apresentaram influência na produção, porém a combinação entre as mesmas não apresentou influência significativa para a produção de etanol, isto pode ser justificado uma vez que a produção de etanol no processo fermentativo está relacionada com o tipo de microrganismo (levedura), temperatura do processo e concentração do mosto. Logo, para efeitos de controle de níveis de etanol na produção da bebida, deve-se monitorar estas variáveis. Ainda na Figura 2, é possível verificar pelo gráfico de superfície que a produção de etanol no mosto é maior para níveis de pH alto (5,0), obtendo-se valores de etanol de 38,6 g/L. É possível notar também que para valores de pH abaixo de 4,0, a produção de etanol foi menor chegando a níveis de 37,1 g/L.

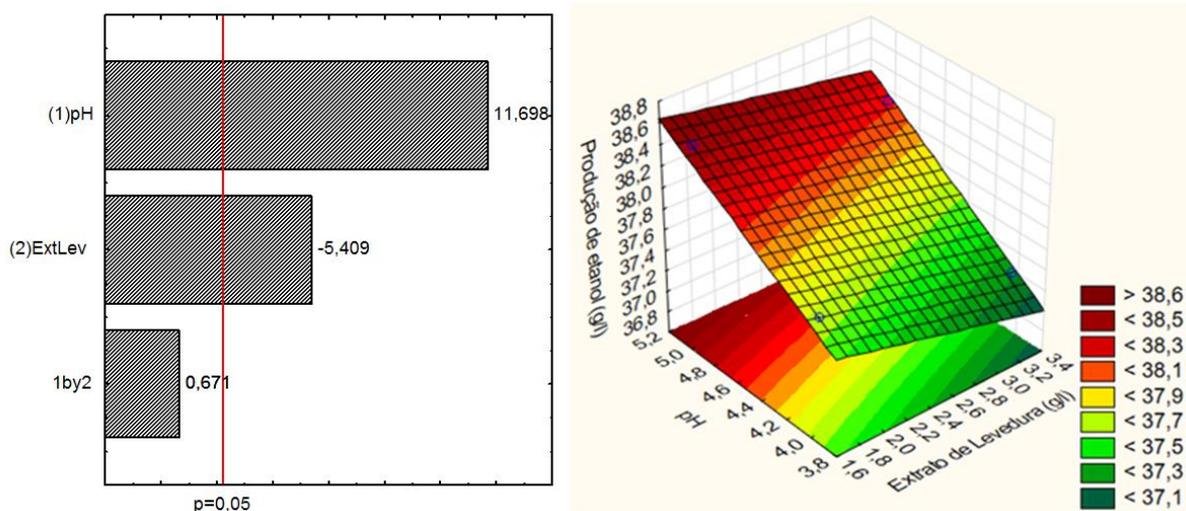


Figura 2. Gráfico de Pareto e de superfície para o experimento.

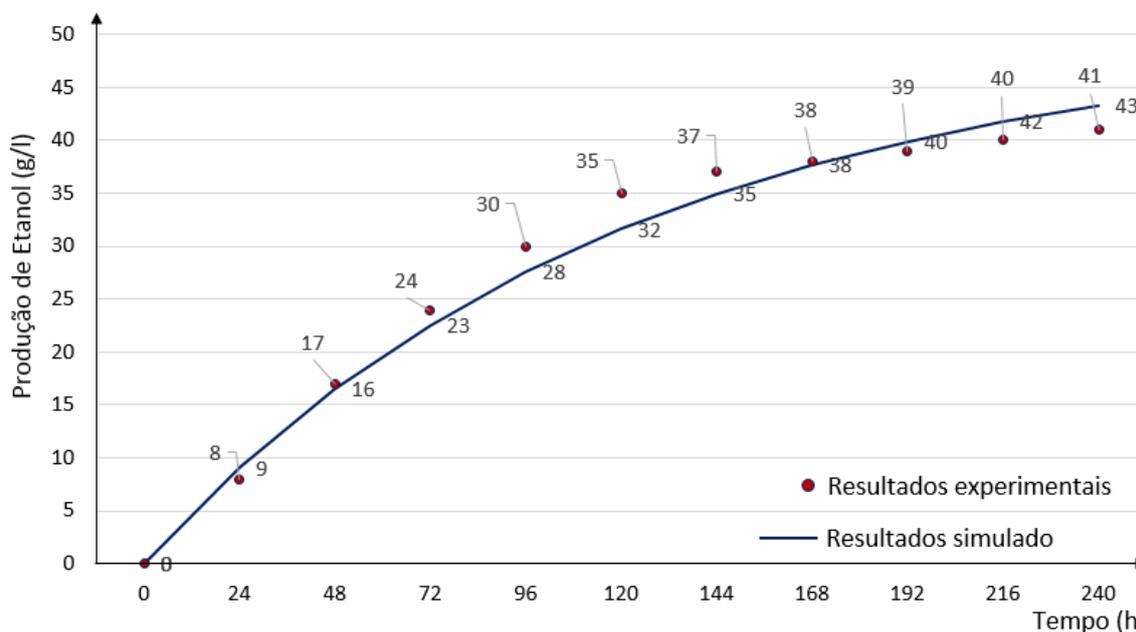


Figura 3. Gráfico da produção de etanol em função do tempo para os resultados experimentais e simulado pelo modelo cinético.

O ajuste do modelo cinético de primeira ordem apresenta uma constante de tempo de 120h para uma quantidade máxima de etanol de 50 g/L. Estes parâmetros podem ser usados em simuladores de processo (exemplo *Aspen Plus*) para prever resultados de operações.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível obter um modelo cinético para a etapa de fermentação na produção de cerveja fazendo uso de um Planejamento Fatorial 2<sup>2</sup>. As variáveis pH e extrato de levedura apresentaram influência significativa nos resultados de concentração de etanol, porém a

combinação dos seus efeitos não são importantes para o processo fermentativo. Observou-se que os resultados simulados pelo modelo cinético proposto se ajustaram bem aos dados experimentais sugerindo valores de 120 h para a constante de tempo do processo e de 50 g/L para a quantidade máxima de etanol no final do processo.

## AGRADECIMENTOS

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco e ao Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. 2003.

BRASIL. **Padronização, classificação, registro, inspeção, produção e fiscalização de bebidas**, 2009.

BRUNELLI, L. T. **Produção de Cerveja com Mel: Características Físico-Químicas, Energéticas e Sensorial**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura). Faculdade Ciências Agrônomicas da Unesp. Botucatu-SP, 2012;

CARNEIRO, D. D. **Estudo Computacional da Etapa Fermentativa da Produção de Cerveja e Proposta de uma Estratégia de Controle para o Processo**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Rio Janeiro, Seropédica-RJ, março de 2010;

CERVBRASIL. 2015. **Anuário 2015 da Associação Brasileira da Indústria da Cerveja**. Disponível em: <[http://www.cervbrasil.org.br/arquivos/ANUARIO\\_CB\\_2015\\_WEB.pdf](http://www.cervbrasil.org.br/arquivos/ANUARIO_CB_2015_WEB.pdf)>. Acesso em: 05 de ago. de 2017.

ESTEVINHO, L. M. **Jornadas de lúpulo e cerveja: novas oportunidades de negócio**. p. 13–14, 2015.

ESTEVINHO, L. M. **Leveduras e fermentações: O caso da cerveja. Jornadas de lúpulo e cerveja: novas oportunidades de negócio**, p. 53-62, 2015.

FREITAS, A. G. DE. **RELEVÂNCIA DO MERCADO CERVEJEIRO BRASILEIRO: avaliação e perspectivas e a busca de uma Agenda de Regulação 1**. Revista Pensamento e Realidade, v. 30, p. 22–33, 2015.

LIMA, L. R.; MARCONDES, A. A. **Álcool Carburante: Uma Estratégia Brasileira**. Curitiba: Editora UFPR, 248p., 2002.

MATOS, R. A. G. **Cerveja: Panorama do Mercado, produção Artesanal e Avaliação de Aceitação e Preferência**. 2011. 90 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Agrônoma). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2011.

RODRIGUES, T. **Transformações Bioquímicas- Guia de Normas e Experimentos**. 2012. Universidade Federal do ABC, 2012.

SMITH CARLOS A., CORRUIPIO ARMANDO, **Princípios e prática do controle automático de processo**, terceira edição, 2008.

VIEGAS, M. C. **Otimização de sistema de fermentação alcoólica contínua utilizando reatores tipo torre e leveduras com características floculantes**. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Faculdade de