

## **Açúcares redutores totais e subprodutos: parâmetros para análise do processo fermentativo**

### **Total reducing sugars and by-products: parameters for analysis of the fermentation process**

Evandro Carlos de Assis <sup>1\*</sup>, José Roberto Delalibera Finzer<sup>1</sup>, Ana Claudia Chesca<sup>1</sup>

---

#### **RESUMO**

O Brasil tem como matéria prima para produção de etanol, a cana-de-açúcar, que se destaca das fontes de biomassas de países concorrentes por seu alto teor de açúcares e produtividade, bem como por sua versatilidade de produção de açúcar e etanol, deixando o país em uma posição extremamente competitiva no mercado internacional. A transformação dos açúcares extraídos da cana-de-açúcar em etanol ocorre devido ao processo de fermentação, onde o caldo recebe uma quantidade de fermento (levedura) que por reação metabólica converterão a sacarose em glicose e frutose e por fim transformando-as em etanol e dióxido de carbono. A emissão de carbono durante todo o processo produtivo de etanol e açúcar é compensada pela absorção do mesmo durante o plantio da cana-de-açúcar sendo a sua cultura benéfica ao meio ambiente. Se considerarmos que durante um processo de fermentação 100% dos açúcares se converteriam em etanol pela ação da levedura, estabeleceríamos uma relação estequiométrica que 100 quilogramas de sacarose, frutose e ou glicose produz 51,11 litros de etanol no entanto tal relação não ocorre na prática devido às reações paralelas realizadas pela levedura que objetivam sua manutenção no meio açucarado. O cálculo do rendimento fermentativo, relação entre açúcares alimentados ao processo e etanol produzido, é de grande importância para avaliação do processo fermentativo e a possível ocorrência de distorções que geram perdas para a produção.

**Palavras-chave:** Cana de açúcar, Etanol; Fermentação; Rendimento fermentativo.

---

#### **ABSTRACT**

The raw material for ethanol production in Brazil is sugarcane, which stands out from the sources of biomass in competing countries for its high sugar content and productivity, as well as for its versatility in the production of sugar and ethanol, leaving the country in an extremely competitive position in the international market. The transformation of sugars extracted from sugarcane into ethanol occurs due to the fermentation process, where the juice receives an amount of yeast (yeast) which, by metabolic reaction, will convert sucrose into glucose and fructose and finally transforming them into ethanol. and carbon dioxide. The emission of carbon during the entire production process of ethanol and sugar is offset by its absorption during the planting of sugarcane, and its culture is beneficial to the environment. If we consider that during a fermentation process 100% of the sugars would be converted into ethanol by the action of the yeast, we would establish a stoichiometric relationship that 100 kilograms of sucrose, fructose and/or glucose produces 51.11 liters of ethanol, however this relationship does not occur in practice. due to the parallel reactions carried out by the yeast that aim to maintain it in the sugary medium. The calculation of the fermentative yield, the relation between sugars fed to the process and ethanol produced, is of great importance for the evaluation of the fermentation process and the possible occurrence of distortions that generate losses for the production.

**Keywords:** Sugarcane, Ethanol; Fermentation; Fermentation yield.

---

---

<sup>1</sup>1. Universidade de Uberaba.

\*E-mail: [evandrovotul@gmail.com](mailto:evandrovotul@gmail.com)

## INTRODUÇÃO

A agroindústria sucroalcooleira nacional, diferentemente do que ocorre nos demais países, opera numa conjuntura positiva e sustentável. O segmento industrial brasileiro produz o etanol ecologicamente correto, que não afeta a camada de ozônio e é obtido a partir de fonte renovável. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro.

Para Pacheco (2011) o etanol, produzido à partir da cana de açúcar é uma alternativa para diminuir problemas ambientais e energéticos no mundo em razão da escassez e alta dos preços dos combustíveis fósseis e da poluição por eles causada. O Brasil encontra-se em uma posição destacada no que se refere à produção de etanol, por apresentar vantagens na tecnologia de produção, liderança na agricultura de energia e mercado de biocombustíveis sem ampliar a área desmatada ou reduzir a área destinada à produção de alimentos. Além disso, a matriz energética brasileira já é um exemplo de sustentabilidade, pois o Brasil utiliza 46,8% dessas fontes.

Segundo Vieira (2012) tão importante quanto à produção de cana por hectare, é a qualidade da matéria prima, medida pelo teor de sacarose contida na planta e que determina o potencial de produção de açúcar por tonelada de cana. A sacarose presente na cana é o componente mais importante na fabricação do açúcar, enquanto os não açúcares inorgânicos, em doses ideais, são os componentes benéficos para o processo de fermentação realizado pelas leveduras na conversão do ART (Açúcares Redutores Totais) em etanol. O teor de açúcares redutores (glicose e frutose) e a polarização da cana determinam a quantidade de açúcar redutor total (ART) da cana, que é, de fato, a quantidade de açúcar total presente na cana (FERNANDES, 2003).

A eficiência e viabilidade econômica deste processo biotecnológico são alcançadas a partir de três parâmetros fundamentais: a eficiência na extração da matéria prima açucarada, ou seja, do caldo de cana, a eficiência do micro-organismo na transformação da matéria prima em produto e um sistema industrial apropriado, com equipamentos e condições que favoreçam a ação do micro-organismo (ANDRADE, 2007; MILANEZ *et al.*, 2012).

A fermentação alcoólica é um processo biológico conduzido pela levedura, normalmente *Saccharomyces cerevisiae*, cuja fisiologia e bioquímica tem sido negligenciada em favor de uma visão físico-química e mecânica do processo. Porém, trata-se de um organismo vivo, com múltiplas habilidades metabólicas, podendo alterar a

estequiometria da fermentação em resposta a alterações no meio, com grande impacto no rendimento do processo (BASSO, 2004).

No processo de fabricação do etanol, o cálculo e acompanhamento do rendimento fermentativo é um parâmetro de fundamental importância para a indústria sucroalcooleira. Este parâmetro indica a porcentagem efetiva de ART (açúcares redutores totais) convertidos em etanol. Este parâmetro baliza o processo fermentativo indicando o sucesso da fermentação ou a necessidade de correções e melhorias dele. A atenção e o acompanhamento do rendimento fermentativo refletirão na garantia do lucro esperado ou gastos e perdas para a unidade industrial. É, portanto, essencial à confiabilidade e exatidão do resultado de rendimento fermentativo e a confiabilidade de sua medição e cálculo.

Considerando a importância do processo de fermentação na produção de etanol, é necessária a proposição de um modelo matemático para controle e análise da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou do mel final. Sabe-se que devido às necessidades metabólicas da levedura, empregada no processo fermentativo, não é possível que 100% do ART presente no caldo seja convertido em etanol, pois é observado que nas usinas o teor de açúcares convertido em etanol é próximo a 90%. Neste contexto a relevância do presente trabalho será auxiliar na escolha do método de avaliação do rendimento fermentativo, de acordo com a realidade estrutural da indústria de açúcar e etanol, e objetivo desta em simplificar o processo de análise e aumentar a confiabilidade e segurança dos dados em análise e o resultado obtido.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Esta metodologia foi baseada em Aurelho Canha (2009), cujo objetivo é comparar os métodos analíticos que calculam os dois tipos de rendimento fermentativo. Os cálculos foram realizados por três safras consecutivas. O mosto, que é o líquido açucarado foi preparado e as correções necessárias para proporcionar o processo fermentativo foram realizadas. Ocorreu uma diluição para corrigir a concentração dos açúcares redutores totais no mesmo e o caldo foi submetido a um tratamento térmico a 105°C, com o objetivo de descontaminação e para a desnaturação das proteínas. Após este tratamento o caldo foi resfriado a 30°C, pois o desempenho das leveduras no processo fermentativo é melhor nesta faixa de temperatura.

O mosto foi inoculado com as leveduras *Saccharomyces cerevisiae* promovendo a conversão de açúcares redutores totais em etanol e dióxido de carbono. Durante o

processo fermentativo ocorreu o controle dos níveis de acidez e do pH, visando favorecer o desempenho das leveduras e evitar contaminações indesejadas. Esta correção foi realizada com ácido sulfúrico, o qual, além de ter ação bactericida, reduz a viscosidade do levedo, desnaturando suas proteínas. Após o término da fermentação iniciou-se a destilação provocando a depuração do vinho, ou seja, a eliminação parcial de impurezas como aldeídos e ésteres e com a finalização de todo o processo de destilação foi obtido o etanol hidratado e etanol anidro, ambos foram destinados para os tanques de estocagem.

Para realizar os cálculos do rendimento fermentativo pelo método dos subprodutos, utilizou-se o emprego da relação expressa nas Equações 1 e 2 e o uso da Equação 3, que demonstra o rendimento.

$$\text{Hexose} + \text{Nutrientes} \rightarrow \text{Etanol} + \text{CO}_2 + \text{Ácidos} + \text{Glicerol} + \text{Massa celular} + \text{Açúcar não convertido} + \text{Outros} \quad (\text{Equação 01})$$

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Etanol} \times 100}{(\text{hexose} \times 0,511)} \quad (\text{Equação 02})$$

$$\text{Rendimento} = \frac{100}{(0,511 \times (2 + KAC + KG + KL + KA))} \quad (\text{Equação 03})$$

Onde:

KAC - kg de ácido produzido / kg de etanol produzido

KG - Kg de glicerol produzido/ kg de etanol produzido

KL - Kg de massa celular produzida/ kg de etanol produzido

KA - Kg de ART não convertido/ kg de etanol produzido

Todos os parâmetros de subprodutos podem ser obtidos sem que seja necessário determinar as vazões desses subprodutos através da análise do etanol e do subproduto, exceto pelo valor de KAC.

## RESULTADOS

Os dados descritos na Tabela 1 e Gráfico 1, abaixo, mostram os resultados reais das 3 safras que os dados foram coletados. Comparando-se os métodos de cálculo de eficiência fermentativa tem-se que a metodologia referenciada balanço de massa ART%, representa o valor real de ART convertido em etanol, ou seja, indica ao gestor responsável o quão assertivo está o sistema controle e quantificação dos dados, sejam eles analíticos ou volumétricos/mássicos.

**Tabela 1** – Resultados comparando-se os métodos de cálculo de eficiência fermentativa.

Balanço	Meses					
	Abril	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.
Massa ART% 2018	104,62	97,41	98,63	104,93	96,38	123,34
Sub Produtos 2018	92,58	92,34	92,52	93,85	93,85	95,27
Massa ART% 2019	108,91	99,53	96,95	102,42	104,79	97,48
Sub Produtos 2019	92,21	92,14	92,13	93,88	93,82	93,97
Massa ART% 2020	109,72	104,20	112,57	108,72	105,54	110,57
Sub Produtos 2020	93,86	93,75	93,66	92,61	91,61	87,21

**Fonte:** (Própria, 2020)

O cálculo do rendimento fermentativo pelo método dos subprodutos baseia-se na somatória de todos os subprodutos formados durante o processo de fermentação do mosto pela ação metabólica da levedura, essas reações paralelas têm como objetivo a manutenção da levedura, no entanto isso promove perdas de ART já que açúcares serão consumidos com outra finalidade não sendo convertidos ao final do processo em etanol. O método de cálculo por meios dos subprodutos utiliza a soma desses subprodutos para determinar o rendimento fermentativo, através da relação estequiométrica, onde justifica-se o ART não convertido em etanol (ANDRIETTA *et al.*, 2006).

Segundo Andrietta *et al.* (2006), o método de cálculo proposto através do balanço de massa de ART, leva em consideração a massa de ART alimentada ao processo fermentativo e o relaciona diretamente com a massa ou volume de etanol produzido, tendo como foco, um direto comparativo entre matéria prima e o produto de interesse final.

Mesmo sendo o método mais adequado para uma análise objetiva do rendimento fermentativo, existem alguns problemas enfrentados para a implantação e manutenção

diária do cálculo fermentativo por meio do balanço de massa. Em alguns casos são observadas oscilações nos valores coletados sendo os mais recorrentes: erro na determinação dos volumes de mosto, vinho e fermento.

Geralmente nos processos operando em batelada alimentada, o balanço de massa para obtenção do rendimento fermentativo utiliza as medições das dornas e cubas para determinar os volumes de vinho, mosto e fermento tratado que por sua vez são utilizados na determinação de etanol produzido, com relação ao ART inserido no processo. Nos processos operando de forma contínua, o cálculo de rendimento fermentativo por balanço de massa de ART, não pode ser realizado sem a utilização de medidores de vazão.

No intuito de diminuir as oscilações do rendimento fermentativo, através do uso deste método, foi proposto uma forma de cálculo cujo número de variáveis utilizadas na determinação é a menor possível. Neste método, utiliza-se o valor de etanol produzido fornecido pelo controle de produção, cuja medida é confiável. Com isto, não é necessário à determinação do volume de vinho e fermento tratado e nem mesmo as análises de etanol nestes produtos para a determinação do volume de etanol produzido na fermentação, que depende somente do volume de etanol produzido, etanol perdido na vinhaça e variação de etanol em processo.

Para a obtenção da massa de ART alimentada ao processo deve-se determinar o volume de mosto utilizando-se um medidor de vazão volumétrico e a concentração de ART% no mosto, o que deve ser analisado através de cromatografia líquida, conferindo assim, maior exatidão. Vazões constantes de mosto, com um controle adequado do valor de Brix auxiliam na diminuição de erros na quantificação da massa de ART alimentado ao processo. Para uma melhor representatividade das amostras, um amostrador ponderado pela vazão deve ser instalado na linha de mosto, permitindo assim, colher amostras por lotes de volume constante e proporcionais de mosto alimentado.

Outra vantagem desta forma de cálculo está no fato de que a mesma pode ser utilizada para obter o rendimento fermentativo tanto de processos operando de forma contínua como batelada alimentada, facilitando assim a comparação entre o desempenho dos dois tipos de processo. Em resumo, na determinação deste rendimento os seguintes cuidados devem ser tomados:

a) Os medidores de vazão devem ser aferidos e instalados de forma correta. Além disto, deve-se atentar para a forma de aquisição dos dados acumulados, de modo a evitar erros nesta totalização, o que comprometeria o resultado.

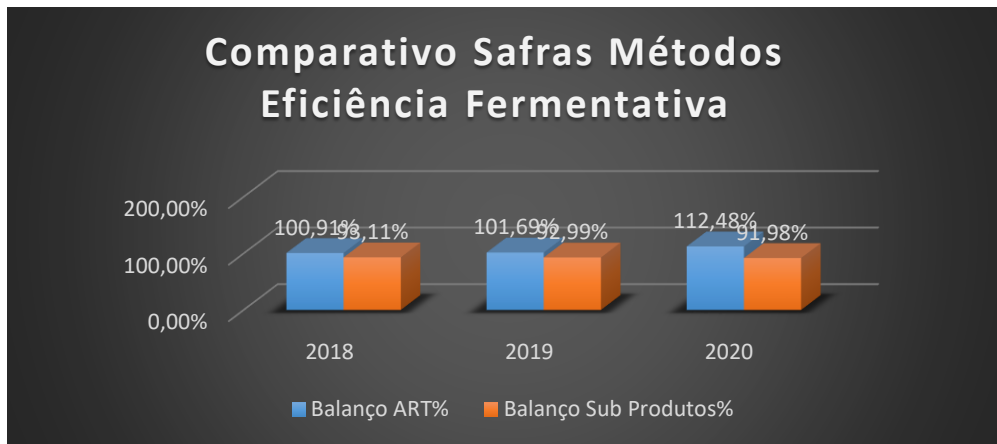
b) As amostras do mosto, vinho e levedo devem ser coletadas de modo prudente, instalando os coletores de amostra vinculados aos medidores de vazão, com refrigeração adequada, a fim de auferir amostras representativas, de modo a se obter um resultado confiável.

c) As análises de ART devem ser realizadas em amostras compostas e com frequência mínima definida, de forma a garantir a confiabilidade dos dados e resultados.

Nota-se que no método ART% o valor de eficiência é sempre maior no decorrer de toda a safra. Isso denota que há problemas de medidas e/ou análises do processo fermentativo, uma vez que a eficiência de fermentação admitida como real, permeia o *range* de 88 a 91%, com base na produção e manutenção celular. Já no sistema de cálculos por sub produtos, vemos uma constância nos valores de eficiência, pois como já descrito acima, o método considera como “eficiência”, todos os produtos secundários, produzidos na rota metabólica, durante a fermentação, trazendo o equilíbrio aos valores de eficiência.

No entanto o método subprodutos, desconsidera uma grande fuga de carbono no processo fermentativo, principalmente os ácidos orgânicos, pois o balanço de produção de ácidos, considera acidez total como sendo sulfúrica. Outra fuga considerável de perda de ART através deste método de cálculo de eficiência está na reação de transformação de acetaldeído em etanol, através da catálise da enzima álcool desidrogenase, reação essa que é reversível. Este método ainda leva a interpretação errônea do rendimento real, uma vez que em fermentações, cujas condições são agressivas ao inóculo (levedura), a produção de células é muito aquém de uma fermentação que opera nos padrões adequados. Essa distorção, produz resultados de eficiência fermentativa maiores em fermentações mal operadas.

**Figura 1** – Comparativo Métodos ART e Sub Produtos (dados safras 18, 19 e 20).



**Fonte:** Assis, Finzer, Chesca (2021).

O cálculo do rendimento fermentativo através do método de balanço de massa ART% é direto, pois considera a massa ou volume de etanol obtido e a massa de ART inserida no processo, volume de levedo e volumes de material em processo nas dornas (reatores). O uso dos medidores de vazões é necessário em cada etapa e propiciam não só uma análise focada na produção de etanol, mas também informação rápida e assertiva. Assim, tem-se a relação direta do produto (etanol), o qual é o foco no processo fermentativo.

## CONCLUSÃO

O cálculo do rendimento fermentativo, é a ferramenta de avaliação do processo de transformação de ART em etanol, permitindo a observação do desempenho das leveduras no mosto, no qual seu resultado pode indicar a necessidade do aprimoramento do processo fermentativo por parte das usinas produtoras, ou a correta manutenção dele.

Quanto a implementação dos métodos de cálculo, o modelo dos sub produtos foi concebido inicialmente para qualificar as fermentações contínuas, isso na década de 80, por possuir maior agilidade e menor custo devido estar relacionado apenas a análises laboratoriais, sem a necessidade de medir o sub produto gerado, sendo considerado apenas os resultados analíticos. O método de subprodutos também foi concebido para cálculo de eficiência de fermentação do tipo contínuo, servindo apenas como referência, não sendo útil para determinar perdas neste processo.

O modelo por balanço de ART pode ser considerado mais simples quanto à formulação matemática, porém, sua implementação exige estudo do projeto industrial para instalação de medidores de vazão com maior precisão, o que gera custos, porém,



esse modelo consegue maior assertividade na quantificação das perdas de ART no processo fermentativo, pois estas perdas na fermentação, estão relacionados diretamente aos índices de eficiência industrial global da unidade produtora.

Outra vantagem do método ART, é que a forma de cálculo utiliza baixo número de variáveis, comparando o resultado teórico obtido com o etanol real produzido, número este que é facilmente obtido através de medições precisas da produção horária, variável esta que é comum aos dois métodos. A razão matemática de ambos os números, gera o rendimento fermentativo real, tendo como base a o etanol produzido.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Rafael Ramos de. **Procedimento para o desenvolvimento de um modelo matemático robusto para o processo de fermentação alcoólica**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ANDRIETTA, S. R.; STECKELBERG, C.; ANDRIETTA, M. G. S. Bioetanol – Brasil, 30 anos na vanguarda. **Revista Multi Ciência**, Campinas, out. 2006.

AURELHO CANHA, Marco. **Rendimento de fermentação na indústria sucroalcooleira**. 2009. 49 f. Monografia (Especialização em Cadeia Produtiva Sucroalcooleira) – Universidade Estadual de Maringá, Umuarama, 2009.

BASSO, L. C. **Fisiologia e ecologia da fermentação alcoólica**. Trabalho apresentado no I Workshop Tecnológico sobre Produção de Etanol, Piracicaba, 2004.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 2. ed. Piracicaba: EME, 2003.

MILANEZ, A. Y.; NYKO, D.; GARCIA, J. L. F.; REIS, B. L. S. F. S. **O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política**. BNDES Setorial, 2012.

PACHECO, T. F. **Produção de etanol: primeira ou segunda geração?** Disponível em: <<http://www.embrapa.br/embrapa/imprensa/artigos/2011/producao-de-etanol-primeira-ou-segunda-geracao#>>. Acesso em: 30 set. 2020.

VIEIRA, D. A. P. FERNANDES, N. C. A. Q. **Microbiologia aplicada**. Inhumas: IFG. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

*Recebido em: 03/07/2022*

*Aprovado em: 05/08/2022*

*Publicado em: 10/08/2022*