

## Dimensionamento de um protótipo de um secador industrial rotativo com aplicação na secagem de açúcar

*Sizing a prototype of a rotary industrial dryer with application in sugar drying*

Alexsander Saves dos Santos, Carlos Henrique Barbosa Sabino, Caroline Ramos Pereira,  
Nayara Cavallari de Paula, Thauany Oliveira Queiroz

Curso de Engenharia Química da Universidade Brasil, campus Fernandópolis, SP, Brasil.  
tauany1014@hotmail.com

Submetido em 15/02/2021; Versão revisada em 21/04/2021; Aceito em 29/04/2021

### Resumo

O secador rotativo é importante para a indústria química devido a sua capacidade de remover líquidos presentes em sólidos através da vaporização térmica. O presente artigo teve como objetivo demonstrar o desenvolvimento de um protótipo de secador rotativo para secagem do açúcar de polarização alta, VHP (do inglês, *Very High Polarization*), similar ao de uma usina de açúcar e álcool. O trabalho mostra a fabricação da unidade estrutura e elétrica, os testes realizados, as análises físico-químicas e as determinações analíticas, abordando parâmetros importantes, como os dados do Sistema Internacional de Unidades e conceitos referente à carta psicrométrica, buscando resultados e a compreensão do processo de secagem. O protótipo, portanto, promoveu uma montagem adequada, cujo funcionamento está dentro das normalidades e produziu-se um açúcar dentro dos parâmetros de qualidade.

**Palavras-chave:** Secagem; Açúcar VHP; Entalpia.

### Abstract

The rotary dryer is important for the chemical industry due to its ability to remove liquids present in solids through thermal vaporization. This article aimed to demonstrate the development of a rotary dryer prototype for drying high polarized sugar, VHP (from English, *Very High Polarization*), similar to that of a sugar and alcohol plant. The work shows the fabrication of the structure and electrical unit, the tests performed, the physical-applied analyzes and the analytical determinations, addressing important parameters, such as the data from the International System of Units and concepts referring to the psychrometric chart, seeking results and understanding of the drying process. The prototype, therefore, promoted an assembly, whose operation is within normal limits and a sugar was produced within the parameters of quality.

**Keywords:** Drying; VHP sugar; Enthalpy.

## INTRODUÇÃO

Pensando na necessidade industrial de acompanhar o constante crescimento na demanda dos produtos industrializados e, ao mesmo tempo garantir o controle da qualidade, começaram-se a estudar técnicas para o desenvolvimento de equipamentos capazes de otimizar a produção.

De acordo com Donzelles, Afonso e Silva (2012), entre as inúmeras invenções, não se fez menos importante à implementação de Secadores em uma das etapas do pré-processamento – sendo então os responsáveis pela secagem artificial, já que a secagem natural se tornou inviável devido ao tempo de espera.

O processo de secagem é concebido como uma operação unitária que demanda uma intensa quantidade de energia, implicando em um grande impacto comercial no custo do produto final (SILVÉRIO, 2012).

Além disso, a vantagem dos secadores é a aceleração da produção em larga escala, retirando parte da água contida no material, diminuindo a umidade através da movimentação da água, decorrente de uma diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser secado e o ar que o envolve (DONZELLES; AFONSO; SILVA, 2012).

Goneli et al. (2014, apud ARAÚJO, 2017) definiu que a remoção de água dos produtos consiste em um complexo processo, envolvendo a transferência simultânea de calor e massa entre o ar de secagem e o produto a ser seco, na qual o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor no produto, provocando a redução no teor de água do mesmo.

Quanto à operação, os secadores são classificados em contínuos ou intermitentes, onde respectivamente, o grão fica constantemente sob a ação do calor até seu teor de umidade atingir o valor desejado, enquanto no segundo caso, o produto passa várias vezes pelo interior do secador antes de completar a secagem (DONZELLES; AFONSO; SILVA, 2012).

De acordo com Brod (2003), o secador contínuo ou vibrofluidizado é constituído de um leito vibrátil com três câmaras que permitem a admissão do ar em diferentes condições de secagem, com possibilidade de se variar a inclinação do leito. A secagem vibrofluidizada consiste na passagem de um fluxo de ar aquecido através do material no leito, que está também submetido a uma agitação mecânica. Sua utilização se dá para materiais que exigem tempo de residência curto, altas taxas de secagem e baixas temperaturas de secagem.

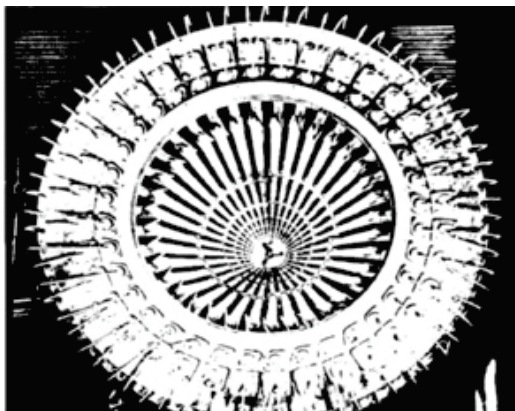
Conforme Nunes (2016), o grão é submetido à ação do ar aquecido na câmara de secagem a intervalos de tempo, permitindo a homogeneização da umidade e resfriamento quando as mesmas estão passando pelas partes do sistema onde não recebem ar aquecido. A intermitência permite que ocorra o transporte de água do interior para a superfície da semente durante o período de equalização, diminuindo a sua concentração dentro da semente.

Já quanto à utilização, os secadores podem ser de secagem combinada – utilizando secadores em altas temperaturas enquanto o produto apresenta teor de umidade mais elevado e, a partir de então o produto quente é transferido para um sistema de baixas temperaturas, reduzindo substancialmente a energia requerida para a secagem – ou do tipo seca-aeração – em que o produto é secado até 2,5 pontos percentuais acima do teor de umidade recomendado para o armazenamento, de maneira a reduzir os danos térmicos causados pela exposição do produto (DONZELLES; AFONSO; SILVA, 2012).

Para a desidratação de comidas, os secadores mais utilizados são os de bandejas ou rotativos, mas quem irá definir o secador adequado é o engenheiro responsável, levando em consideração as especificações do produto em questão e o ponto de vista econômico (ALONSO; PARK, 2005).

“No secador rotatório, os sólidos são derrubados, numa corrente contínua, na região do eixo do tambor rotatório, enquanto o ar é injetado através da cascata de grãos” (FOUST, 1982).

Segundo Treybal (1981), devido à alta superfície de exposição do sólido nos tabuleiros ou túneis de secadores permite uma alta taxa de secagem tornando a operação lucrativa. A Figura 1 demonstra o interior de um secador rotativo do século XX.



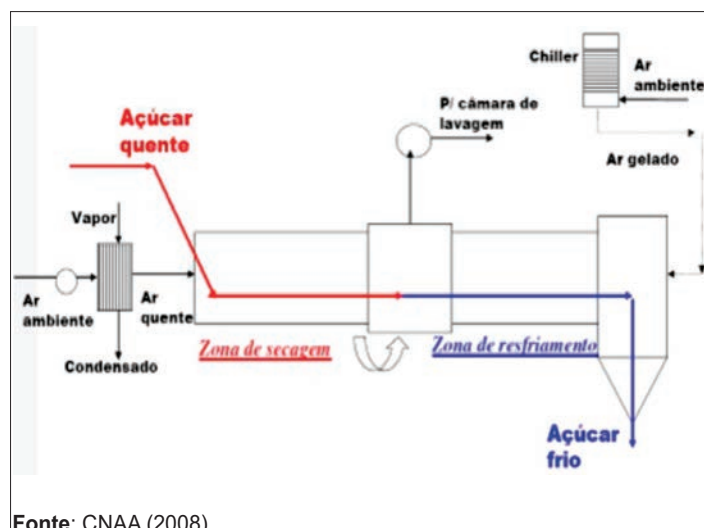
Fonte: Foust (1982).

Figura 1: Secador rotativo.

Uma das formas de se aumentar a capacidade do secador rotativo é acelerar a sua rotação, desde que o mesmo tenha comprimento suficiente para não lesar o tempo de retenção (DUCATTI, 2016). O tempo de retenção é muito interessante, visto que se deve obedecer a um tempo mínimo para o gás ou ar secante passe por todo material até alcançar a secagem desejada (FOUST *et al.*, 1982, *apud* CARVALHO, 2019). O tempo mínimo para sua retenção deve ser de 10 a 15 minutos (DUCATTI, 2016).

A técnica empregada nesse tipo de secador é formada por tambores cilíndricos que possuem rotação. As pás em seu interior auxiliam o material adicionado em uma das extremidades a percorrer por todo o equipamento (CHUN, LIM e YOSHIKAWA, 2012; WANG *et al.*, 2009, *apud* LEONEL, 2014). Deve-se respeitar a velocidade limite de ar dentro do secador, caso contrário o ar vai arrastar não só o pó, mas também quantidades pequenas de grânulos. O ar quente deve ter a velocidade de 1,5 a 1,8 m/s, já o ar frio deve ser de 2,5 a 3,0 m/s (DUCATTI, 2016). A Figura 2 representa o funcionamento de um secador rotativo com exaustor central, em que durante o processo de secagem o açúcar quente, devido à ação de ar e vapor, passa respectivamente, pela zona de

secagem e resfriamento.



Fonte: CNAA (2008).

Figura 2: Secador rotativo com exaustor central.

O projeto, portanto, visa desenvolver um protótipo de secador rotativo para aplicabilidade na secagem do açúcar de polarização alta, da sigla VHP (do inglês, “Very High Polarization” é o açúcar bruto, ainda com a camada de mel que cobre o cristal do açúcar; e serve de matéria-prima para a produção de açúcar refinado e outros processos de industrialização) estando adepto as normas e vantagens do secador rotativo a nível industrial (normas NR 10 e NR 12; vantagens: operação contínua, estrutura simples e de fácil operação).

## METODOLOGIA

O projeto foi realizado na Universidade Brasil em Fernandópolis-SP, situada na Estrada F-1, s/n, Fazenda Santa Rita, entre os meses de abril a junho de 2020. O protótipo teve como base o sistema de secagem da Usina Vale do Pontal, situada na estrada Antônio Cabrera Mano, s/n- CP 14 - Zona Rural em Limeira do Oeste – MG. A Figura 3 representa as etapas realizadas para o desenvolvimento do projeto.

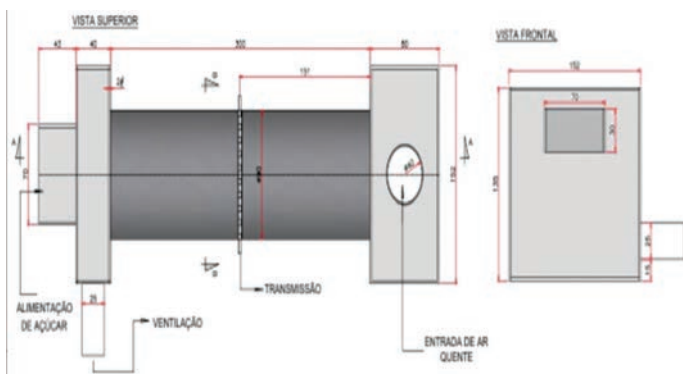
### Montagem do secador rotativo

Através do programa AutoCAD, desenvolveu-se o desenho técnico com todas as dimensões (mm) do protótipo do secador rotativo. A Figura 4 representa uma visão superior e frontal do protótipo.



Fonte: Autoria própria.

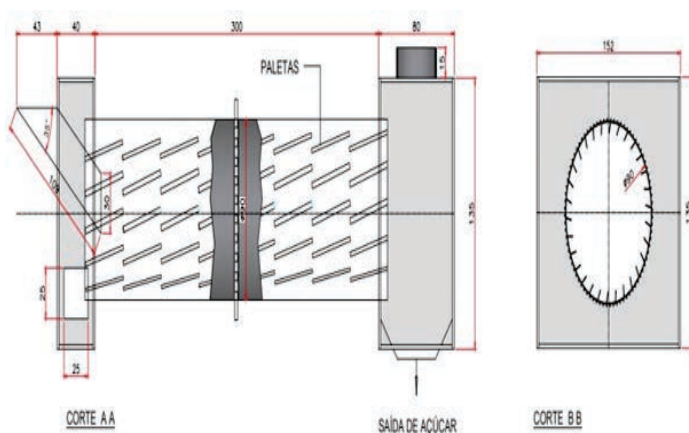
Figura 3: Etapas desenvolvidas no projeto.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4: Visão superior e frontal do protótipo do secador rotativo.

A Figura 5 representa o dimensionamento da região interna do protótipo do secador rotativo, demonstrando o corte AA e corte BB, respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5: Região interna do protótipo do secador rotativo.

Os materiais, representado pelo Quadro 1 foram adquiridos em parceria com a Usina Vale do Pontal, de Limeira do Oeste- MG em consonância com os recursos próprios.

Quadro 1  
Materiais utilizados no protótipo.

Materiais	Unidade	Quantidade
Tubo inox 6''	m	350
Chapa inox 1/8''	mm	800
Engrenagem dentada	mm	380
Barra chapa 1/8'' x 1	mm	600
Rolamento 6202	un	4
Corrente	mm	800
Escova Rotativa 127 V ou 220 V	un	1
Motoredutor SKF lubrificador	un	1
Mini secador	un	1
Escova rotativa 127 V	un	1
Cooler	un	1

Legenda: m: metros, mm: milímetros e un: unidade.

Fonte: Autoria própria

Para a confecção do corpo do secador rotativo, cortou-se 0,3m de comprimento da chapa inox 1/8''. Em seguida, soldou-se na região interna do tambor várias barras de inox de 1/8'' formando as paletas. Após, para construção do sistema rotativo fixou-se uma engrenagem dentada de 0,38m e quatro rolamentos no corpo do secador.

Para construção da primeira estrutura da extremidade do projeto cortou-se duas chapas inox 1/8'' de 0,135x 0,080m e soldou-se em duas chapas inox 1/8'' de 0,152x0,135m, sendo uma delas com o furo central de 0,090m de diâmetro.

Para a fabricação da segunda estrutura da extremidade do protótipo cortou-se duas chapas de 0,135 x 0,040m e soldou-se em duas placas de inox 1/8'' com 0,152 x 0,135m, sendo uma das duas com um furo central de 0,090m de diâmetro. Acoplaram-se as duas estruturas das extremidades no corpo do secador rotativo.

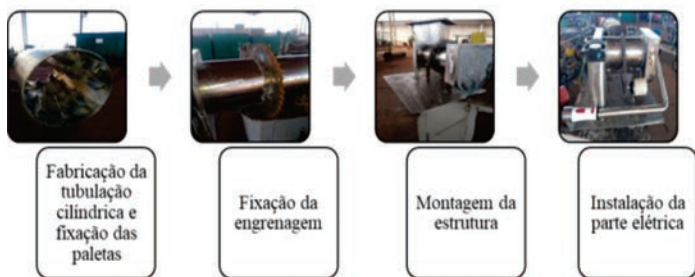
Logo após, construiu uma estrutura cilíndrica com a chapa de inox 1/8'' de 0,135m de altura com diâmetro de 0,030m e instalou-se o cooler. Em seguida, utilizou-se 0,3 m de tubo inox 6'' para conectar o corpo do protótipo a uma escova rotativa.



Para fabricação do suporte do secador rotativo, utilizou-se 0,6m de barra chapa 1/8" e cortou-se quatro tubos de inox 6". Logo após, soldou-se o corpo do secador, as estruturas das extremidades e o tubo que contém o cooler no suporte.

Para o sistema de transmissão, instalou-se 0,8m de corrente na engrenagem dentada e para conexão do motor redutor SKF.

A Figura 6 demonstra as principais etapas de montagem do protótipo do secador rotativo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6: Montagem do projeto.

A Figura 7 representa o protótipo de secador rotativo finalizado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 7: Secador rotativo concluído

### Teste do secador rotativo

O teste do protótipo do secador rotativo foi realizado na cidade de Limeira do Oeste- MG, no dia 01 de junho de 2020.

Inicialmente, ligou-se o dispositivo e avaliou-se a havia a presença de vazamentos ou qualquer outra

anormalidade na unidade estrutural, e se a unidade elétrica estava funcionando adequadamente.

Para o funcionamento do dispositivo, mediu-se por meio da balança de raios infravermelhos a temperatura e umidade do açúcar VHP que seria inserido no processo de secagem. Em seguida, colocou-se 300g de açúcar VHP no secador rotativo, tampou-se e aguardou-se até a saída do açúcar após o processo secagem.

Durante o processo de secagem, observou-se o funcionamento dentro dos padrões dos dispositivos individualmente e as suas atuações em conjunto com os demais equipamentos, principalmente a escova rotativa, as engrenagens, o moto redutor e o cooler.

Ao término do teste, mediu-se novamente a umidade do açúcar VHP na balança de infravermelho e anotaram-se os resultados.

### Cálculos do secador rotativo

Visando avaliar o desempenho do protótipo, realizaram-se inúmeros cálculos de operações unitárias para se obter valores como área, velocidade e volume referente ao equipamento de secagem da umidade e a entalpia relacionadas ao açúcar VHP durante a entrada e saída do secador rotativo. Para encontrar a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco, definindo assim a razão de umidade, utilizou-se a Equação 1.

$$W = \frac{MM_v P_v}{MM_{ar} P_{atm}} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que  $W$  é a umidade absoluta dado em  $g/kg$ ,  $P_v$  é a pressão parcial do vapor em  $P_a$  e  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica em  $P_a$ ,  $MM_v$  é a massa molar do vapor em  $g/mol$  e  $MM_{ar}$  é a massa molar do ar dado em  $g/mol$ .

A obtenção da umidade relativa é possível por meio de um instrumento como higrômetros ou por determinação analítica, aqui representada pela a Equação 2.

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que  $UR$  é a umidade relativa dada em %,  $P_v$  é a pressão de vapor de água no ar em,  $P_a$  e  $P_{vs}$  é a pressão de vapor de saturação em  $P_a$ .

Calculou-se a entalpia da mistura de ar e água, do açúcar na entrada e saída do secador, utilizando a Equação 3.

$$h = h_a + x \cdot h_v \quad (\text{Equação 3})$$

Em que  $h$  é a entalpia dada em  $kJ/kg$ , é a entalpia do ar ou açúcar em  $kJ/kg$ ,  $x$  é conversão de base úmida para seco em  $kgH_2O/kg$  e  $h_v$  é a entalpia de vapor d' água.

Para obtenção da entalpia é importante a conversão de base úmida para base seca do produto durante a entrada e saída do secador rotativo, cuja fórmula está representada pela Equação 4.

$$x = \frac{w}{1-w} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que  $x$  é a conversão de base dada em  $kgH_2O / kg$ ,  $w$  é a umidade de entrada ou saída do secador rotativo dado em  $g/kg$ .

A presença de uma umidade de equilíbrio pode ser explicada com aplicação da regra de fases do físico Josiah Gibbs, representado pela Equação 5.

$$V = C + 2 - F \quad (\text{Equação 5})$$

Em que  $V$  é a variância do sistema é adimensional, é o número de componentes presentes no sistema é adimensional e  $F$  é o número de fases presente no sistema é adimensional.

Para se obter a área e volume do protótipo, utilizou-se as fórmulas do cilindro representado pela Equação 6 e Equação 7, respectivamente.

$$A = 2\pi r(r + L) \quad (\text{Equação 6})$$

$$V = h\pi r^2 \quad (\text{Equação 7})$$

Em que é a área dada em  $m^2$ ,  $r$  é o raio em m,  $L$  é a altura do secador rotativo dado em m,  $V$  é volume dado em  $m^3$  e  $\pi$  é um número irracional.

Em seguida, obteve-se o valor da velocidade de secagem em função da umidade, representada pela Equação 8.

$$N = - \frac{\Delta W \cdot m_d}{A \cdot \Delta t} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que  $N$  é a velocidade de secagem do sólido em m/s,  $\Delta W$  é a variação da umidade dada  $kg/m^3$ ,  $m_d$  é a massa seca (açúcar),  $A$  é a área em  $m^2$  e o  $\Delta t$  é a variação de tempo dada em s.

### Análise laboratorial da umidade do açúcar VHP

A análise da umidade do açúcar VHP antes e depois do processo de secagem do protótipo do secador rotativo foi realizada no laboratório da Usina Vale do Pontal da cidade de Limeira do Oeste- MG.

Para realização da análise da umidade, foi pesado em uma balança de raios de infravermelhos 10g do açúcar VHP antes do processo de secagem e esperou-se 10 minutos, anotando após, o resultado. Em seguida, pesou-se novamente na balança de infravermelho 10 g do açúcar após o processo de secagem do protótipo, esperaram-se 10 minutos e anotou-se o resultado. A Figura 8 representa a amostra de 10g de açúcar VHP na balança de infravermelho.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8: Amostra do açúcar VHP.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de secagem é uma das operações unitárias mais importantes na indústria química, cujo objetivo principal é a remoção de um líquido presente em um sólido por meio da vaporização térmica, promovendo um produto de qualidade e gerando rentabilidade para indústria.

Segundo Santos et al (2020), o açúcar VHP (*Very High Polarization*) é o importante para indústria química, pois além de ser um açúcar de alta polarização durante a sua produção não utiliza aditivos químicos no processo de sulfitação, o mesmo possui uma larga produção promovendo produto de melhor qualidade. Portanto, o produto analisado no protótipo do secador rotativo será o açúcar VHP.

Com a ideia de planejamento e seguindo todas as normas regulamentadoras, criaram-se mecanismos importantes para do projeto. Como desenvolvimento do desenho técnico que funcionou como um manual de montagem, permitiu uma construção adequada, promovendo uma análise do equipamento e do açúcar VHP de forma coerente com a literatura, portanto, não evidenciou nenhum problema durante os testes do secador rotativo.

A fim de avaliar a capacidade do protótipo do secador rotativo, compararam-se os resultados com os valores da Usina Vale do Pontal e com a literatura.

**Quadro 2**

Principais dados para realização da determinação analítica.

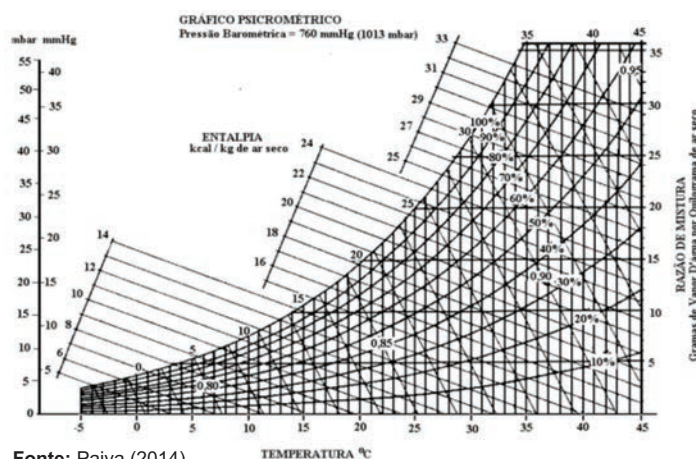
SISTEMA INTERNACIONAL		PROTÓTIPO	
Variáveis	Valores	Variáveis	Valores
Calor específico da água	4,178 KJ Kg <sup>-1</sup> °C	Diâmetro do secador	0,09 m
Calor específico do ar	1,005 KJ Kg <sup>-1</sup> °K	Temperatura entrada	56°C
Calor específico do açúcar	0,280 Kcal Kg <sup>-1</sup> °C	Temperatura saída	36°C
Calor latente da água	2501,4 KJ Kg <sup>-1</sup>	Comprimento secador	0,3 m
Pressão atmosférica	101,325KPa	Temperatura de vapor	100°C
Pressão de saturação da água	2,339KPa	Temperatura referência	0°C

Fonte: Autoria própria.

Os dados para realização dos cálculos foram obtidos por meio de parâmetros importantes, como valores padronizados pelo Sistema Internacional de Unidades, referente ao açúcar, ar e água e os valores relacionados ao próprio protótipo do secador rotativo.

Portanto, o Quadro 2 mostra os principais dados para a realização das determinações analíticas.

Conforme as explanações de Oliveira (2014), estudar e entender as propriedades do ar é importante para diversas atividades humanas. Portanto, a carta psicrométrica representada pela Figura 9 é outro parâmetro que fornece dados importantes para o artigo, pois não só permite compreender as propriedades do ar, mas também possibilita a compreensão do processo de secagem.



Fonte: Paiva (2014).

**Figura 9:** Carta psicrométrica.

Inicialmente, por meio um higrômetro mediu-se a umidade relativa, obtendo o valor de 60%, a fim de confirmar e comparar esse valor utilizou-se os métodos analíticos. Com a utilização de termômetro, identificou-se a temperatura do ambiente ou temperatura do bulbo seco de 20°C, e com Equação 1 e com o valor da pressão atmosférica e da massa molar da água e do ar obteve-se a pressão parcial do vapor de aproximadamente 1,4 kPa. Com isso, utilizando a Equação 2 e com o valor da pressão de saturação da água à 20° C, obteve-se o valor da umidade relativa de 59,9%, confirmando que tanto o resultado do higrômetro, quanto dos métodos analíticos são similares.

Em seguida, considerando o valor da umidade relativa de 60%, da temperatura do bulbo seco de 20°C e a temperatura de secagem de 100°C medido através de um termômetro, foi possível interpretar a carta



psicrométrica e obter novos valores relacionados ao ar do ambiente e o ar de secagem. O Quadro 3 demonstra os resultados após a análise e interpretação da carta psicrométrica.

**Quadro 3**

Valores resultantes da análise e interpretação da carta psicrométrica.

CARTA PSICROMÉTRICA			
VARIÁVEIS	UNIDADE	AR DO AMBIENTE	AR DE SECAGEM
Temperatura de bulbo seco	°C	20	100
Temperatura de bulbo úmido	°C	15	62
Razão de mistura (vapor/seco)	g/kg	0,008731	0,008731
Pressão de vapor	Pa	2337,747	1402,647
Entalpia	Kj/kg de ar seco	42,31	124,17
Temperatura de ponto de orvalho	°C	12	12
Volume específico	m <sup>3</sup> ar/ kg ar seco	0,842	1,071
Umidade relativa	%	60	1,38
Pressão de vapor de saturação	Pa	1402,647	101341,5

Fonte: Autoria própria.

De acordo com dados apontados por Oliveira (2014), o parâmetro de qualidade do açúcar referente à umidade após o período de secagem deve ser no máximo 0,15% v/v. Com isso, durante os testes laboratoriais, mediu-se por meio de uma balança de infravermelho a umidade durante a entrada e saída da amostra do açúcar VHP, obtendo respectivamente um valor de 0,8% e 0,09%. A Figura 10 demonstra a umidade do açúcar medido pela balança de infravermelho após o processo de secagem de 0,09%, portanto, está dentro do parâmetro de qualidade. O açúcar na saída do secador rotativo da Usina foi de 0,04%.



Fonte: Autoria própria.

**Figura 10:** Resultado da umidade do açúcar após o processo de secagem

Após a obtenção da umidade, foi possível calcular as conversões de base úmida para seca utilizado a Equação 4. Durante a entrada do açúcar, obteve-se um valor de  $8,00 \times 10^{-3}$  kg de H<sub>2</sub>O/ kg de ar, e durante a saída

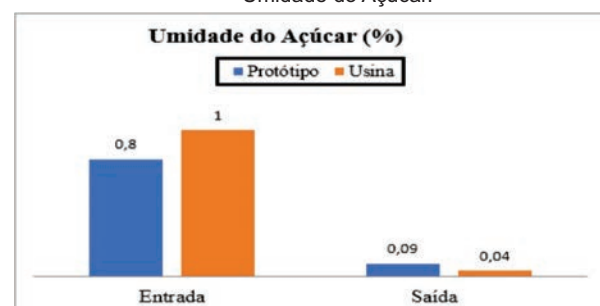
um valor de  $9,00 \times 10^{-4}$  kg de H<sub>2</sub>O/ kg de ar. Com esses resultados, foi possível calcular as entalpias do açúcar durante a entrada e saída do secador rotativo. A conversão de base úmida para seca durante a entrada e saída do secador rotativo industrial da usina são respectivamente,  $1,00 \times 10^{-2}$  kg de H<sub>2</sub>O/ kg de ar e  $4,00 \times 10^{-4}$  kg de H<sub>2</sub>O/kg de ar.

As conversões de base, com temperatura de referência de 0°C e a temperatura do açúcar durante entrada de 56°C e a de saída de 36°C, obtiveram-se a entalpia do açúcar de entrada com um valor de 17,56 *Kj/kg* e saída com um valor de 10,21 *Kj/kg*. O açúcar proveniente do secador rotativo da Usina possui uma temperatura de entrada de 70°C e de saída 35°C, com isso, sua entalpia de entrada é de 22,52 *Kj/kg* e de saída de 9,86 *Kj/kg*.

Outra variável importante é a condição de equilíbrio que pode ser explicada aplicando a regra de fases de Gibbs. O sistema de secagem do protótipo conta com três componentes: açúcar, água e ar, e duas fases: sólido úmido e ar, portanto, o valor da variância do sistema, isto é, a energia livre atrelado ao sistema termodinâmico é 3. De acordo com Ferreira (2014), quanto menor for a energia livre maior será a sua estabilidade, logo a condição de equilíbrio é a de mínima energia livre. O valor da variância aplicando a regra de Gibbs do sistema de secagem da usina também foi 3.

Plotou-se gráficos com objetivo de comparar a umidade do açúcar VHP, as temperaturas e as entalpias do produto durante a entrada e saída do secador rotativo referente ao protótipo e a usina. O Gráfico 1 representa a umidade do açúcar VHP durante a entrada e saída do equipamento.

**Gráfico 1**  
Umidade do Açúcar.

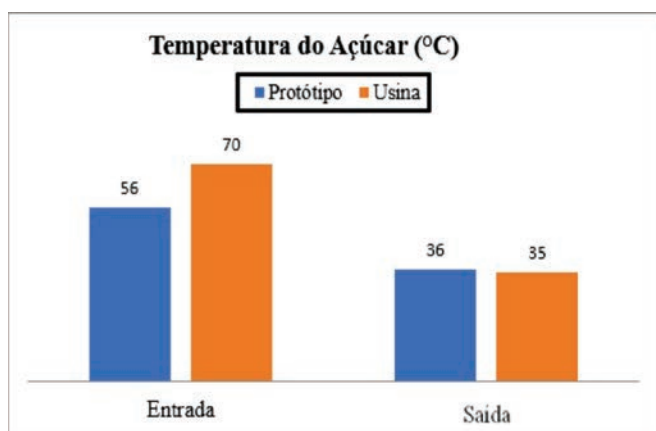


Fonte: Autoria própria.



O Gráfico 2 demonstra as temperaturas em °C do açúcar VHP durante a entrada e saída do secador rotativo.

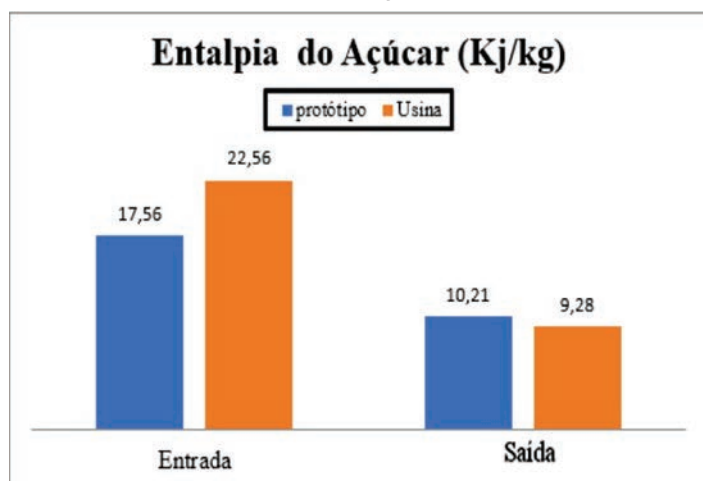
**Gráfico 2**  
Temperatura do açúcar.



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 3 representa as entalpias em KJ/Kg do açúcar VHP durante a entrada e saída dos dispositivos

**Gráfico 3**  
Entalpia do açúcar



Fonte: Autoria própria.

Em relação à unidade física e considerando o corpo do protótipo um formato cilíndrico, obteve-se a área do secador igual a  $9,75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  e o volume de  $1,908 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ . O secador rotativo industrial da Usina possui uma área de  $98 \text{ m}^2$  e um volume de  $60 \text{ m}^3$ .

Calculou-se a velocidade de secagem considerando o tempo de secagem de 30 segundos e obteve-se o valor de  $2,43 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ . Segundo Carvalho (2019), o protótipo desenvolvido pelo mesmo, consistiu-se em uma velocidade de secagem de  $2,52 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ .

## CONCLUSÃO

O projeto atendeu todos os objetivos propostos, funcionando de forma adequada (NR 10 e NR 12) e eficiente durante o processo de secagem do açúcar VHP. Através da interpretação da carta psicrométrica foi possível entender as propriedades do ar e permitiu-se analisar por meio dos valores o comportamento do ar no ambiente e na secagem. Observando as temperaturas, entalpias, umidade, pressões e volume específico, encontraram-se valores similares entre o ar de secagem e do ambiente, como a razão de misturas de  $8,70 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$  e uma temperatura de ponto de orvalho de  $12^\circ\text{C}$ .

O método analítico demonstrou que a capacidade estrutural do protótipo, com uma área de  $9,75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  e um volume de  $1,908 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , permitiu no processo de secagem uma velocidade de  $2,43 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ .

Os cálculos de conversão de base úmida para seco permitiram a obtenção das entalpias do açúcar durante a entrada de  $17,56 \text{ KJ/kg}$  e saída com  $10,21 \text{ KJ/kg}$  do protótipo. A aplicação da regra de fases de Gibbs neste projeto permitiu obter as condições de equilíbrio do sistema, ou seja, obteve-se uma energia livre de 3, cujo conhecimento é importante para indústria química, como por exemplo, possibilita observar a estabilidade do sistema termodinâmico.

As análises físico-químicas realizadas no laboratório comprovaram que o protótipo do secador rotativo produziu um açúcar dentro dos padrões estabelecidos, uma vez que o produto entrou com  $56^\circ\text{C}$  e umidade 0,8% e com o processo de secagem, passou a ter uma temperatura de  $36^\circ\text{C}$  e uma umidade de 0,09%, valores condizentes com a literatura e dentro dos parâmetros de qualidade.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente a Deus, aos professores envolvidos em especial ao Me. Alexander Saves dos Santos, por ter proposto essa experiência, a Universidade Brasil pelo suporte e claro não podemos esquecer-nos dos nossos familiares que nos incentivaram a todo o momento.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO, Luis Felipe Toro, PARK, Kil Jin. **Métodos de seleção de secadores**, 2005. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/cta/v25n2/25012.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2020.
- ARAÚJO, Livia de Sá. **Desenvolvimento de um secador rotativo para grãos de sorgo**, 2017. Disponível em:< [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20278/1/2017\\_LiviaDeSaAraujo\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20278/1/2017_LiviaDeSaAraujo_tcc.pdf)> . Acesso em: 10 mai. 2020.
- ARRUDA, E. B. **Secagem de fertilizantes em secadores rotativos**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, PPG- EQ/ UFU, 2008.
- BROD, Fernando Pedro Reis. **Avaliação de um secador Vibro-Fluidizado**, 2003. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/296832517.pdf>>. Acesso em: 25 mai. 2020.
- CARVALHO, Ludimila da Silva. **Construção de um secador rotatório e aplicabilidade na secagem do açúcar**. Núcleo do conhecimento, 2019. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/secador-rotatorio>>. Acesso em: 25 mai. 2020.
- CNAA, Companhia Nacional de Açúcar e Álcool. **Conceitos técnicos da produção de açúcar e insumos**. Disponibilizado pela empresa, 2008.
- DONZELLES, Sérgio Maurício Lopes, AFONSO, Adriano Divino Lima, SILVA, Juarez de Souza. **Secagem e Secadores**, 2012. Disponível em: <<https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-armazenagem-cap5.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2020.
- DUCATTI, João Carlos. **Secadores de açúcar: otimização e instalação de Chiller**. Piracicaba, Engenharia sucroalcooleira, 2016. Disponível em: <<https://piracicabaengenharia.com.br/secadores-de-acucar-otimizacao-e-instalacao-de-chiller/>>. Acesso em: 24 mai. 2020.
- FERREIRA, Regiane. **Regra das fases ou lei das fases de Gibbs**, 2014. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/235657720/Regra-Das-Fases-de-Gibbs>>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- FOUST, A. S. **Princípios de operações unitárias**, 1982. Disponível em: <<https://pdfslide.net/documents/principios-de-operacoes-unitarias-foust.html>>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- LEONEL, Edimilson Cândido. **Análise da eficiência energética e otimização de secadores rotativos**, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4141/6056.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 06 jun. 2020.
- NUNES, Antonio Gomes. **Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para secagem de frutas**, 2016. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/16049/1/ANTONIO%20GOMES%20NUNES%20TESE%20%28PPGEP%29%202016.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2020.
- OLIVEIRA, Danilo Toste. **Parâmetro de qualidade do açúcar e amarelecimento no armazenamento**, 2014. Disponível em: <<http://www.ceagesp.gov.br/wp-content/uploads/2015/01/palestra.danilo.tostes.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- PAIVA, Rogério. Blog. **Carta psicrométrica**, 2014. Disponível em: <<http://rogeriobaiva.blogspot.com/2014/03/carta-psicrometricas-sofwares-para.html>>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- SANTOS, A. S., TOLEDO, C. D., PEREIRA, F.F, LIMA, J. S. Desenvolvimento de centrífuga automática para produção de açúcar de polarização alta. **Revista Engenharia de Interesse Social- UEMG**. Ano 5.v. 5, n. 5. p. 1-16. jan.-jun., 2020.
- SILVÉRIO, Beatriz Cristina. **Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em diferentes tipos de secadores rotatórios**, 2012. Disponível em: <<http://clyde.dr.ufu.br/bitstream/123456789/15065/1/EstudosFluidodinamicosSecagem.pdf>>. Acesso em: 23 mai 2020.
- TREYBAL, Robert. **Mass Transfer Operations**. 3. ed. Singapore, Malásia: McGraw- Hill, 1981.