

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALISSON PINHEIRO

SECAGEM POR *SPRAY DRYING*:
Avaliação de desumidificadores com sólido dessecante

São Leopoldo
2019

SECAGEM POR *SPRAY DRYING*:

Avaliação de desumidificadores com sólido dessecante

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

São Leopoldo

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o apoio durante a graduação e valores ensinados ao longo da minha vida, em especial, minha mãe Clecira que sempre cuidou de todos nós. Agradeço a minha melhor amiga e companheira Gabriela, por toda paciência e amor. Agradeço aos meus colegas da universidade pela parceria durante a jornada acadêmica e ao meu orientador Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan por me ajudar nos desafios enfrentados durante a elaboração deste trabalho. E também ao Sr. Luiz Carlos Ferreira pelas informações técnicas que contribuíram para a obtenção de resultados reais de processo.

RESUMO

O presente trabalho introduz os conceitos de secagem e a importância deste processo em diversos segmentos da indústria. Em seguida, são mostradas algumas das formas de secagem e é apresentada a secagem por *spray*. Conhecidas como *spray dryers*, essas máquinas possuem diversas formas construtivas e são capazes de secar os mais variados produtos. Este trabalho analisa o processo de secagem por *spray drying* a partir da bibliografia de produção do leite em pó. Neste estudo é utilizado um atomizador de disco rotativo e uma câmara de secagem de simples estágio. Todas as dificuldades de operação e controle do processo de secagem utilizando ar ambiente são apresentadas, com atenção especial à influência do clima local, com destaque para a umidade e sua interferência na qualidade do produto final e na operação contínua da instalação industrial. Para solucionar os problemas operacionais e de controle se avalia os ganhos em umidade residual final do produto, energia térmica e qualidade através da instalação de um desumidificador do tipo sólido dessecante para fornecimento de ar desumidificado ao processo de secagem por *spray drying*. Os dados obtidos a partir da estação automática do INMET foram utilizados para a análise do clima local e os resultados mostram que além do controle total durante a secagem, é possível reduzir em até 15,4% o consumo de energia térmica do *spray dryer* com a utilização da tecnologia de desumidificação por adsorção, desta forma, reduzindo emissões provenientes da queima de combustível e gerando maiores lucros ao negócio.

Palavras-chave: Secagem. *Spray dryer*. Desumidificador. Roda dessecante. Umidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de um <i>spray dryer</i> de simples estágio.	18
Figura 2: Carta psicrométrica para altas temperaturas.	19
Figura 3: Variação da umidade relativa média do ar para a cidade de Porto Alegre ao longo do ano de 2018.....	21
Figura 4: Variação da umidade relativa média do ar para a cidade de Porto Alegre de 15 a 18 de maio de 2018.....	21
Figura 5: Exemplo da formação de grumos em processo de secagem de tanino.	22
Figura 6: Diferentes formas construtivas de câmaras de secagem simples estágio.....	23
Figura 7: Efeito da atomização homogênea sobre a superfície do <i>spray</i>	24
Figura 8: Bico atomizador.	25
Figura 9: Atomizador de disco rotativo.....	26
Figura 10: Princípio de funcionamento de um ciclone.....	27
Figura 11: Diagrama esquemático do princípio de funcionamento de uma válvula rotativa. ...	27
Figura 12: Princípio de funcionamento de desumidificadores com sólido dessecante.	29
Figura 13: Fluxograma para o desenvolvimento do trabalho.	34
Figura 14: Indicador de prejuízo por conta da umidade do produto.	35
Figura 15: Impacto da variação climática no <i>spray dryer</i>	37
Figura 16: Diagrama esquemático simplificado do <i>spray dryer</i>	38
Figura 17: Diagrama esquemático do sistema de aquecimento do ar de secagem.	39
Figura 18: Escoamento do ar em um desumidificador com roda de sólido dessecante.	40
Figura 19: Efetividade global do <i>spray dryer</i> - Variação $T_a \times \eta$	44
Figura 20: Vazão volumétrica de ar do <i>spray dryer</i> - Variação $T_a \times V$	45
Figura 21: Energia térmica ideal sem desumidificação - Variação $T_a \times Q$	47
Figura 22: Trocador de calor aletado RHF-1495X1840-4 do <i>spray dryer</i>	48
Figura 23: Energia térmica real sem desumidificação - Variação $T_a \times Q_{real}$	50
Figura 24: Consumo do <i>spray dryer</i> sem desumidificação - Variação $T_a \times m_{comb}$	51
Figura 25: Desumidificador linha ICA Munters.	53
Figura 26: Detalhe do escoamento de ar no desumidificador ICA-3000.	55
Figura 27: Energia térmica real do <i>spray dryer</i> com desumidificação - Variação $T_a \times Q_{dd}$	57
Figura 28: Energia térmica para aquecer o ar de secagem do <i>spray dryer</i> com e sem desumidificação - Comparação $T_a \times Q_{dd} \times Q_{real}$	58

Figura 29: Comparação do consumo de combustível do <i>spray dryer</i> com e sem desumidificação.	59
Figura 30: Demonstração da desumidificação na secagem por <i>spray drying</i> em um diagrama de Mollier para altas temperaturas.....	61
Figura 31: Volume de controle da roda dessecante.....	62
Figura 32: Resultado final – Consumo de combustível com e sem desumidificação.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variações do clima de Janeiro e Agosto de 2019.....	42
Tabela 2: Cálculo da umidade absoluta para as variações do clima de Janeiro a Agosto de 2019.	43
Tabela 3: Energia térmica ideal necessária para aquecer o ar úmido - Variação T_a x Q	46
Tabela 4: Projeto térmico do sistema de aquecimento do ar de secagem do <i>spray dryer</i>	49
Tabela 5: Poder calorífico inferior de diferentes combustíveis utilizados na instalação.....	50
Tabela 6: Cálculo da capacidade de remoção de umidade ideal, MRC	52
Tabela 7: Cálculo da capacidade de remoção de umidade real, MRC_{real}	54
Tabela 8: Temperatura de saída do desumidificador, T_{sdd}	56
Tabela 9: Energia térmica para aquecer o ar de secagem desumidificado, Q_{dd}	57
Tabela 10: Energia térmica sensível, latente e de regeneração para a desumidificação.	63
Tabela 11: Energia térmica Q_{FINAL} para operação do <i>spray dryer</i> com desumidificador.....	64
Tabela 12: Resultado final – Redução de energia térmica.	64

LISTA DE SIGLAS

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilating, and Air-Conditioning</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorología
NIPA	<i>New India Publishing Agency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

A	Vazão mássica de ar necessário para a secagem (kg/h)
A_d	Vazão volumétrica de ar no desumidificador (m^3/h)
A_r	Vazão volumétrica de ar na unidade de regeneração do desumidificador (m^3/h)
A_{sd}	Área de superfície do <i>spray dryer</i> (m^2)
c_{a1}	Calor específico do ar em T_1 (kcal/(kg°C))
c_{a2}	Calor específico do ar em T_2 (kcal/(kg°C))
c_{aa}	Calor específico do ar úmido em T_a (kcal/(kg°C))
$c_{aa;dd}$	Calor específico do ar desumidificado em T_a (kcal/(kg°C))
c_{v1}	Calor específico do vapor d'água em T_1 (kcal/(kg°C))
c_{v2}	Calor específico do vapor d'água em T_2 (kcal/(kg°C))
c_{va}	Calor específico do vapor d'água em T_a (kcal/(kg°C))
$c_{va;dd}$	Calor específico do vapor d'água em T_a desumidificado (kcal/(kg°C))
dp_{T_a}	Temperatura de orvalho em T_a (°C)
K	Coefficiente de perda de calor por radiação (kcal/(m^2h))
m_{comb}	Consumo de combustível para aquecer o ar de secagem (kg/h)
\dot{m}_d	Vazão mássica de ar no desumidificador (kg/s)
MRC	Capacidade ideal de remoção de umidade do desumidificador (kg/h)
MRC_{real}	Capacidade real de remoção de umidade do desumidificador (kg/h)
MRR	Capacidade de regeneração do desumidificador (kg/h)
P_{atm}	Pressão atmosférica (Pa)
PCI_{comb}	Poder calorífico inferior do combustível em base úmida (kcal/kg)
Q	Energia térmica ideal para aquecer o ar de secagem úmido (kcal/h)
Q_{dd}	Energia térmica para aquecer o ar de secagem desumidificado (kcal/h)
Q_{FINAL}	Energia térmica para aquecer o ar de secagem e regenerar o ciclo (kcal/h)
Q_{lat}	Energia latente da roda dessecante (kcal/h)
Q_{real}	Energia térmica real para aquecer o ar de secagem úmido (kcal/h)
Q_{reg}	Energia térmica ideal para regeneração da roda dessecante (kcal/h)
$Q_{reg;real}$	Energia térmica real para regeneração da roda dessecante (kcal/h)
Q_{sens}	Energia sensível da roda dessecante (kcal/h)

Q_{total}	Energia total da roda dessecante (kcal/h)
T_1	Temperatura na entrada (°C)
T_2	Temperatura na saída (°C)
T_a	Temperatura ambiente (°C)
T_f	Temperatura do líquido na alimentação (°C)
T_{sdd}	Temperatura de saída do desumidificador (°C)
TSL	Teor de sólidos do líquido na alimentação do <i>spray dryer</i> (-)
TSP	Teor de sólidos do produto em pó na saída do <i>spray dryer</i> (-)
TXA	Taxa de alimentação do <i>spray dryer</i> (kg/h)
TXE	Taxa de evaporação do <i>spray dryer</i> (kg/h)
TXS	Taxa de saída do produto em pó do <i>spray dryer</i> (kg/h)
UR_{Ta}	Umidade relativa do ar em T_a (-)
\dot{V}	Vazão volumétrica do ar de secagem do <i>spray dryer</i> (m ³ /h)
y_a	Umidade absoluta do ar atmosférico (kg H ₂ O/kg ar seco)
y_{de}	Umidade absoluta do ar na entrada do desumidificador (kg H ₂ O/kg ar seco)
y_{ds}	Umidade absoluta ideal do ar na saída do desumidificador (kg H ₂ O/kg ar seco)
$y_{ds;real}$	Umidade absoluta real do ar na saída do desumidificador (kg H ₂ O/kg ar seco)
y_{re}	Umidade absoluta do ar na entrada da unid. de regeneração (kg H ₂ O/kg ar seco)
y_{rs}	Umidade absoluta do ar na saída da unid. de regeneração (kg H ₂ O/kg ar seco)

Símbolos gregos

Δy	Variação da umid. entre entrada e saída do desumidificador (g H ₂ O/kg ar seco)
D	Efetividade global do processo de secagem (-)
ρ_d	Massa específica do ar no desumidificador (kg/m ³)
ρ_r	Massa específica do ar na unidade de regeneração do desumidificador (kg/m ³)
ε	Efetividade dos trocadores de calor (-)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Justificativa	15
1.4 Estrutura do trabalho	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 <i>Spray Drying</i>	17
2.2 Psicrometria e características do ar	18
2.3 Componentes de um <i>spray dryer</i>	23
2.3.1 Câmara de secagem.....	23
2.3.2 Atomizador	24
2.3.3 Ciclones.....	26
2.4 Aplicação de um desumidificador em um <i>spray dryer</i>	28
2.5 Processo e dimensionamento	30
2.5.1 Ar de secagem.....	30
2.5.2 Desumidificação	32
3 METODOLOGIA	33
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1 Análise do clima local	41
4.2 Dados de processo e características da instalação industrial	43
4.3 Energia térmica necessária para aquecer o ar de secagem na temperatura ambiente sem desumidificação	46
4.4 Seleção do desumidificador com sólido dessecante para o processo	52
4.5 Energia térmica necessária para aquecer o ar de secagem com desumidificação por adsorção	55
4.6 Comparação e resultados de processo	58
4.7 Resultados finais e análise de viabilidade	60
4.7.1 Umidade	60
4.7.2 Regeneração	62
4.7.3 Análise Econômica	65
5 DISCUSSÃO	67

6 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A água, essencial para a vida no nosso planeta, regula o clima e a temperatura. A presença da água no ar conduz à definição da umidade e sua influência gera inúmeros efeitos em equipamentos e processos. A umidade do ar pode influenciar em custos produtivos, durabilidade de ativos, consumo de energia e impacto ambiental.

Secagem é o processo onde parte significativa da umidade é removida de um produto líquido ou sólido. Isso ocorre através da evaporação de um solvente que, na maioria dos casos é água, até níveis aceitáveis de umidade residual. O processo de secagem visa prevenir o crescimento microbiológico, reduzir o volume do produto, custos de embalagem, transporte, armazenamento e estocagem.

Dentro do campo da secagem, a secagem por *spray* ou *spray drying* é o processo industrial para desidratação de uma solução que contém sólidos dissolvidos. Esse processo é caracterizado pela transformação de um líquido em um *spray* de pequenas gotículas com grande área de superfície, expostas a uma corrente de ar quente que promove a evaporação da água de forma muito rápida, convertendo as gotículas líquidas em partículas de pó.

Amplamente utilizados nas indústrias, os *spray dryers* possuem papel importante na produção, pois exigem o controle de diversas variáveis para atingir os níveis de qualidade e produção exigidos. Os principais custos de operação destas máquinas estão relacionados à energia necessária para aquecimento do ar utilizado na secagem, energia elétrica consumida pelos equipamentos e as suas manutenções. Os *spray dryers* são utilizados desde aplicações em laboratório até produções de grande escala, principalmente nas indústrias alimentícia, farmacêutica e química e requerem cuidados de projeto, operação e também das condições externas que podem interferir no controle de operação e na qualidade do produto final.

A importância do controle das condições do ar utilizado nos *spray dryers* e a influência da umidade nas indústrias que possuem essas máquinas, pode ser explicada pelo fato que a maioria dos materiais utilizados na produção tem algum grau de higroscopia e possuem uma tendência natural de absorção da umidade presente no ar. Em altos níveis, o conteúdo de umidade pode resultar em: aumento de peso e volume, efeitos indesejáveis na qualidade do produto, eficiência do processo, modificação de propriedades do produto, alteração das condições para crescimento de bactérias e micro-organismos.

Para contornar condições climáticas desfavoráveis à secagem, usualmente, são realizados ajustes de parâmetros do equipamento. Contudo, os resultados nem sempre são satisfatórios, em especial para produtos altamente higroscópicos, que possuem propriedades

adesivas e que são operados em regiões que apresentam grandes variações de temperatura e umidade ao longo das estações do ano e até mesmo ao longo do dia.

Monitorar as condições do ar e gerenciá-las pode resolver diversos problemas e a busca por soluções que representem melhorias na produtividade, consumo de energia e qualidade é o tema deste trabalho.

O controle das condições do ar utilizado na secagem por *spray drying*, através da desumidificação, busca eliminar a influência do clima, que não é um parâmetro sob controle durante a operação de um *spray dryer*. Desta forma, a taxa de saída do produto em pó independe de condições externas, mantendo a sua especificação mais homogênea, ou seja, sem grandes variações que acontecem pelas flutuações da umidade. O resultado do gerenciamento das condições do ar é uma operação segura do ponto de vista de especificação final do produto. Isso ocorre, pois, o conteúdo residual de umidade, por vezes é mantido menor que o especificado para garantir que o produto não seja recusado ou bloqueado pelo controle de qualidade, o que representa redução da margem de lucro da empresa.

Através da utilização de tecnologias de desumidificação, busca-se analisar o processo de *spray drying* e determinar os ganhos que podem ser obtidos com a redução da umidade absoluta do ar injetado na câmara de secagem. Para avaliação de tais modificações, uma metodologia de cálculo é apresentada e aplicada a dados de um processo real de secagem.

A análise completa deste processo e sua compreensão são necessárias para fornecer soluções adequadas e que possam melhorar a performance de equipamentos. Para isso, a utilização de literatura técnica adequada e a demonstração de problemas operacionais reais se fazem necessários com o objetivo de encontrar as melhores formas de operação que proporcionem ganhos produtivos e retornos financeiros aos negócios das empresas.

Por se tratar de um processo que envolve muitas variáveis, configurações que variam de acordo com o produto a ser secado e também as capacidades produtivas de cada planta industrial, estabelece-se que as condições específicas de projeto, operação e exemplos utilizados neste trabalho estarão limitadas a *spray dryers* que operam utilizando um atomizador de disco rotativo. Nas análises realizadas, o ar é aquecido através de trocadores de calor de vapor e óleo térmico instalados em série na descarga do ventilador de injeção. O sistema de transporte utilizado é pneumático com separação de finos através de ciclones e as características do produto atomizado são similares as do leite em pó.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar os possíveis ganhos de produtividade e redução do consumo de energia térmica através da instalação de um desumidificador com sólido dessecante para fornecimento de ar de secagem desumidificado ao processo de *spray drying*.

Uma vez determinados os parâmetros de operação de *spray dryers* convencionais e realizado o cálculo do consumo de energia para aquecimento do ar buscar-se-á determinar se a utilização do desumidificador tipo dessecante pode reduzir a energia empregada para obter a mesma quantidade de produção de pó e também resolver problemas de qualidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir da determinação da importância do gerenciamento das condições do ar utilizado na secagem, não somente em um único segmento, mas em todos os tipos de indústria e também dos grandes problemas práticos que podem ser evitados com a tecnologia da desumidificação por adsorção no fornecimento de ar ao *spray dryer*, também são objetivos deste trabalho:

- a) Analisar um processo de secagem real e utilizar a bibliografia técnica para encontrar as vazões de ar necessárias no dimensionamento do desumidificador para escalas de produção na ordem de 1700 kg/h de pó com umidade residual de 7%;
- b) Analisar se é possível estabelecer uma condição de operação de modo a proporcionar o melhor controle da umidade residual do produto, através do fornecimento de ar desumidificado para a secagem;
- c) Avaliar a energia empregada para aquecimento do ar de secagem úmido e desumidificado. Calcular e comparar o consumo de energia térmica do desumidificador para regeneração do ciclo de adsorção e verificar se possíveis reduções de custos operacionais com combustíveis de aquecedores e caldeiras poderão ser obtidas.

1.3 Justificativa

A umidade do ar pode ter profunda influência nos materiais, custos de produção, serviços de manutenção e durabilidade de ativos, assim como no consumo de energia. Isso se aplica praticamente a todos os setores da indústria. A maioria dos materiais, substâncias e insumos utilizados nas industriais, química, farmacêutica e alimentícia possuem uma tendência à absorção de umidade, conhecido como higroscopia. Apesar de todos os efeitos que a umidade pode causar, por muitas vezes é um fator ignorado, resultando em impactos na produtividade, orçamento e qualidade dos produtos. As tecnologias para resolução destes problemas, por muitas vezes são desconhecidas e são encontradas poucas soluções efetivas no mercado brasileiro que possam trazer os benefícios acima mencionados.

Através do gerenciamento das condições do ar utilizando um desumidificador, com o objetivo de reduzir sua umidade para processos de *spray drying*, busca-se atingir resultados de produção igual ou superiores, com redução do consumo de energia que está associado ao aquecimento do ar de secagem e também estabelecer uma condição operacional estável para resolver problemas de qualidade na produção de produtos em pó.

Para verificar as reais vantagens e desvantagens da utilização de desumidificadores para fornecer ar com teor de umidade reduzido a processos de secagem com *spray dryers*, utilizam-se na elaboração deste trabalho equações, valores e termos de produção baseados em processos comumente encontrados em plantas industriais que utilizam *spray drying*.

A acuracidade na elaboração dos cálculos é necessária para verificação de possíveis ganhos na produtividade, que está relacionado à taxa de saída de produto em pó e também possíveis reduções do custo de energia térmica. Por essa razão, busca-se utilizar a literatura técnica mundialmente conhecida na área de secagem e conceitos de disciplinas da área de energia para compreender o funcionamento do processo e dos desumidificadores.

Com grande variação de umidade ao longo das estações do ano, a cidade de Porto Alegre, localizada na região Sul do Brasil é o local escolhido para avaliação do processo de desumidificação. Para isso, dados obtidos de estações de meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia são utilizados.

O aquecimento do ar de secagem é comumente realizado através de trocadores de calor que utilizam vapor e/ou óleo térmico, mas também pode ser utilizada a queima direta. Nesses processos, há apenas a redução da umidade relativa do ar, mantendo a umidade absoluta inalterada, gerando assim diferentes condições de saída do produto em pó que está sendo atomizado. Reduzir o conteúdo de umidade do ar, antes de seu aquecimento, além dos

benefícios já mencionados, ainda pode contribuir na redução da corrosão de equipamentos, trocadores de calor e dutos que transportam o ar até a câmara de secagem. A análise da utilização de desumidificadores em um *spray dryer*, mostra-se como importante ponto a ser estudado com potencial de aplicação em indústrias modernas, onde altos níveis de qualidade e eficiência são requisitados.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica desse trabalho e todos os conceitos, componentes e equacionamentos que são utilizados no projeto e operação de *spray dryers* são descritos. No mesmo capítulo também é apresentada a teoria de desumidificação e a importância da utilização dos desumidificadores para gerenciamento das condições do ar em processos de secagem.

O próximo item a ser abordado será a metodologia, encontrada no capítulo 3. Nesta etapa, o impacto da utilização de desumidificadores é demonstrado com a aplicação dos conceitos apresentados no capítulo anterior. Para seu desenvolvimento, utilizam-se dados de entrada de processos de *spray drying* que podem ser encontrados em plantas industriais de fabricação de leite em pó e produtos semelhantes. Com isso, busca-se tornar a análise o mais realista possível.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos dos diversos cálculos realizados para o processo e busca determinar os possíveis benefícios da redução da umidade do ar de secagem do equipamento. A discussão e considerações finais, encontradas ao final, estabelecem se os resultados da aplicação dos desumidificadores foram satisfatórios e finalmente determina sua aplicabilidade nas indústrias que têm esse processo e que estão localizadas em regiões com grandes variações de umidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Spray Drying*

O processo de desidratação ou secagem de um sólido ou líquido é a operação de remoção de água ou de qualquer outro líquido na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada (BARBOSA, 2015).

A remoção da água reduz a atividade biológica e a deterioração do produto e, além disso, reduz substancialmente os custos de embalagem, armazenamento, estoque e transporte (JAYARAMAN E DAS GUPTA, 1992).

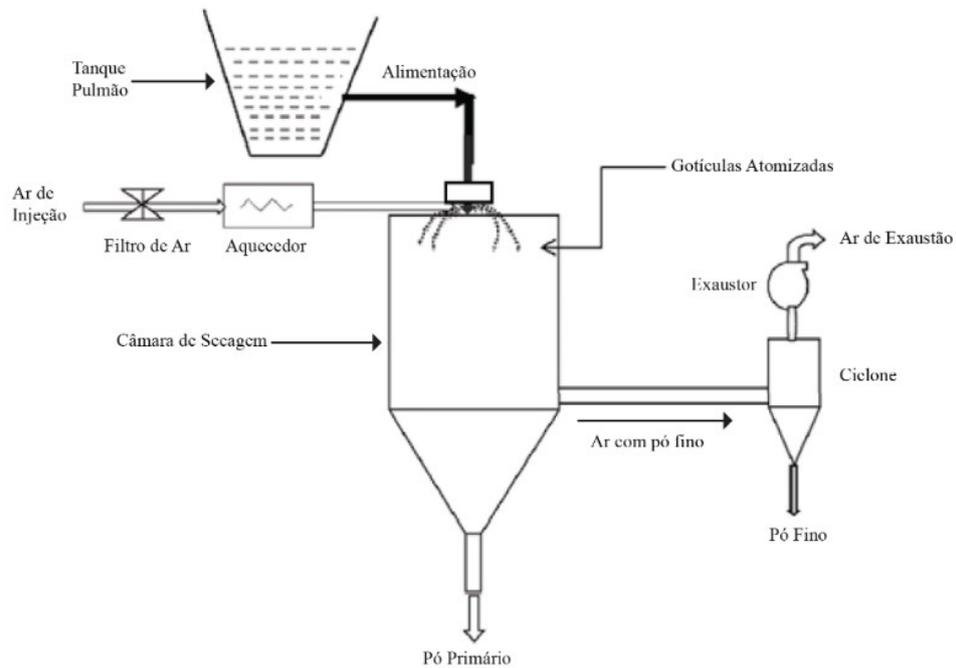
Spray drying é um processo industrial que transforma o líquido em um *spray* de pequenas gotículas e as expõe a uma corrente de ar quente. A grande área de superfície do *spray* causa a evaporação, convertendo as gotículas em pó (PISECKY, 1997).

No *spray dryer* o líquido é bombeado a partir de um tanque e dispersado pelo atomizador, formando gotículas dentro da câmara de secagem que, em contato com um volume suficiente de ar quente, promove a rápida evaporação do solvente e as partículas sólidas podem ser coletadas. O ar carregado de umidade e com um percentual de finos deixa a câmara de secagem e a separação destes finos é realizada por meio de ciclones.

De acordo com Pisecky (2012), a evaporação no *spray dryer* ocorre, inicialmente, sob condições adiabáticas. Neste sistema, todo o calor sensível do ar de secagem é utilizado para evaporação da água, o qual se torna, como vapor, parte do ar de secagem. A entalpia do ar se mantém constante durante esse processo.

Na Fig. 1 é apresentado um diagrama esquemático de um *spray dryer* de simples estágio.

Figura 1: Diagrama de um *spray dryer* de simples estágio.



Fonte: *New India Publishing Agency – NIPA (2015)*.

Em instalações convencionais de simples estágio de *spray drying*, como a apresentada na Fig. 1, o ar é captado e transportado do ambiente por meio um ventilador até a câmara de secagem. Entre os filtros de ar e a câmara de secagem, estão localizados os trocadores de calor, responsáveis por aquecer o ar até a temperatura necessária para secar o produto atomizado pelo dispositivo instalado no dispersor de ar, na parte superior da câmara.

Nesta configuração, o produto atomizado mistura-se à corrente de ar quente de maneira a atingir o conteúdo final de umidade desejado apenas antes do ar e as partículas deixarem a câmara de secagem. Conforme Pisecky (2012), as menores gotículas perdem aproximadamente 90% de sua umidade numa distância de 0,1 m do dispositivo de atomização, enquanto as maiores necessitam aproximadamente 1 m de distância. Ainda segundo Pisecky (2012), a remoção do restante da umidade no final do processo de secagem é lenta e custa caro.

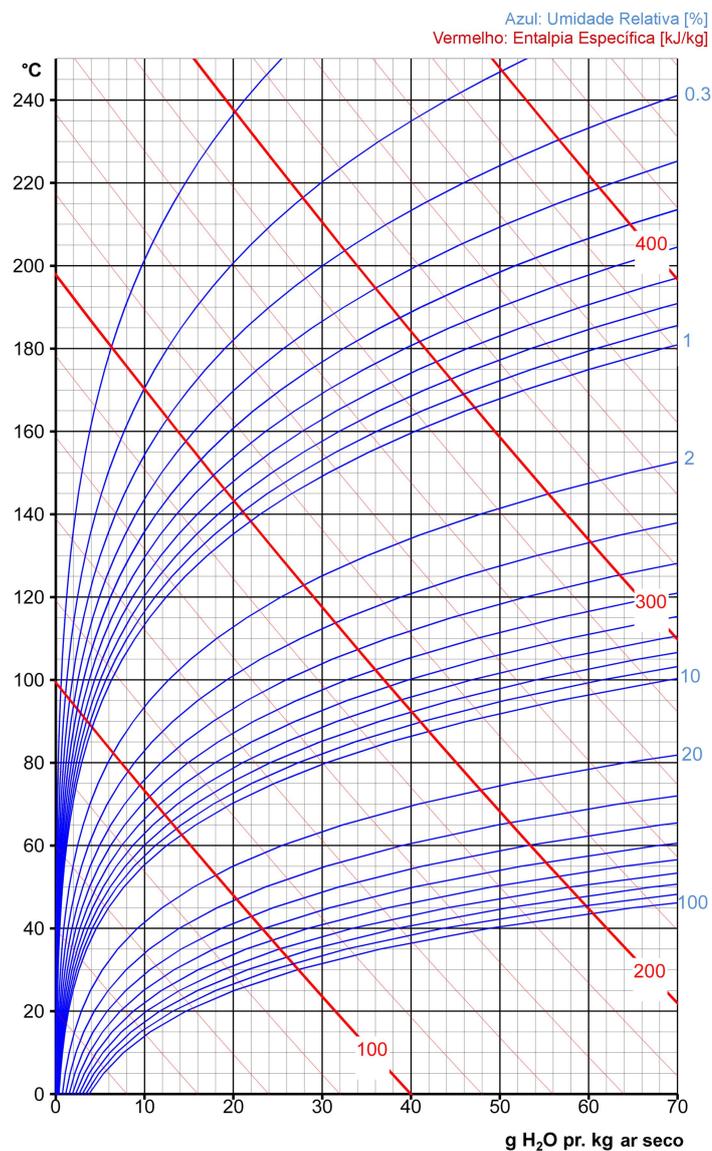
2.2 Psicrometria e características do ar

A psicrometria utiliza as propriedades termodinâmicas para analisar condições e processos envolvendo ar úmido. O ar atmosférico contém vários gases que o compõem,

principalmente nitrogênio e oxigênio, além de água e diversos poluentes, como por exemplo, fumaça e poeira. Em *spray dryers* convencionais o meio de secagem utilizado para obtenção do produto em pó é o ar atmosférico filtrado e aquecido.

No início do século XX, o professor alemão Richard Mollier criou o método gráfico de representar as propriedades de várias misturas de ar e vapor d'água. Tais gráficos são conhecidos por diferentes nomes em diferentes países. São exemplos: diagrama h-x do ar, diagrama de Mollier e carta psicrométrica, contudo, todos se referem a técnicas similares de representação. A Fig. 2 apresenta a carta psicrométrica para altas temperaturas, tipicamente utilizada em *spray drying*.

Figura 2: Carta psicrométrica para altas temperaturas.



Fonte: GEA Group (2019).

A seguir são apresentados os termos utilizados que caracterizam o ar de secagem:

Ar seco é ar atmosférico com todo o vapor d'água e contaminantes removidos. Sua composição é relativamente constante, mas pequenas variações ocorrem de acordo com tempo, localização geográfica e altitude do local.

Ar úmido é uma mistura de ar seco e vapor d'água. A quantidade de vapor d'água varia de zero até um máximo, que depende da temperatura e pressão.

Saturação é o estado de equilíbrio entre o ar úmido e a fase de condensação.

Umidade absoluta do ar é a relação da quantidade de vapor d'água com a quantidade de ar seco.

Umidade relativa do ar é a relação entre a pressão parcial do vapor d'água e a pressão do vapor d'água no ponto de saturação, na mesma temperatura.

Temperatura de bulbo seco é a temperatura lida em um termômetro padrão. É também chamada de temperatura sensível do ar.

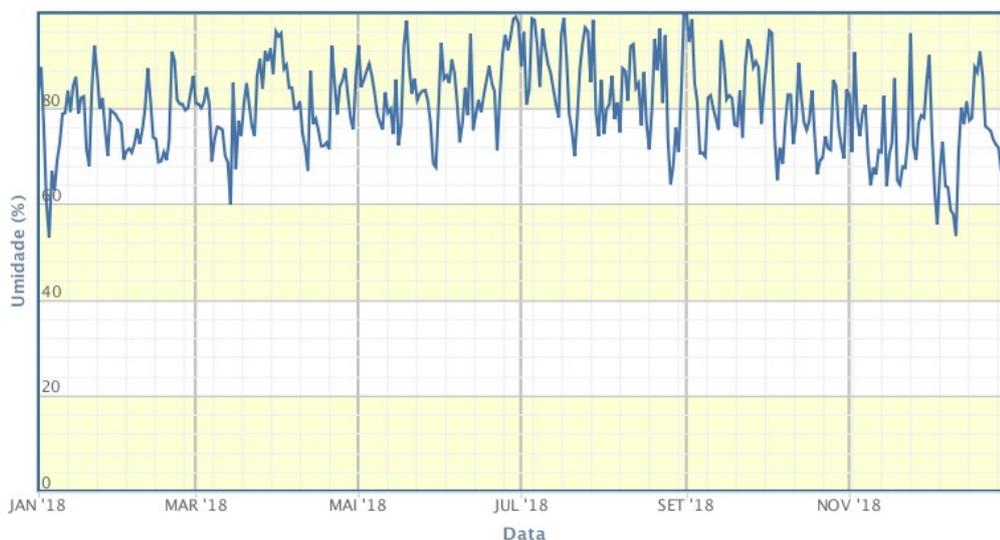
Temperatura de bulbo úmido é a temperatura medida com o bulbo do termômetro mergulhado em uma mecha úmida. Representa o resfriamento do termômetro proporcionalmente à evaporação da água.

Pressão de vapor é a soma da pressão exercida por todas as moléculas de água presentes no ar.

Temperatura do ponto de orvalho é a temperatura onde o resfriamento provoca o início da condensação da água. Neste ponto, a quantidade de vapor de água presente no ar é máxima.

A variação da umidade do ar afeta diretamente a secagem e operação do *spray dryer*, em especial, produtos que são sensíveis à absorção de umidade e também onde faixas estreitas de umidade residual são requisitadas. A Fig. 3 apresenta a variação da umidade relativa média do ar ao longo do ano de 2018 para a cidade de Porto Alegre.

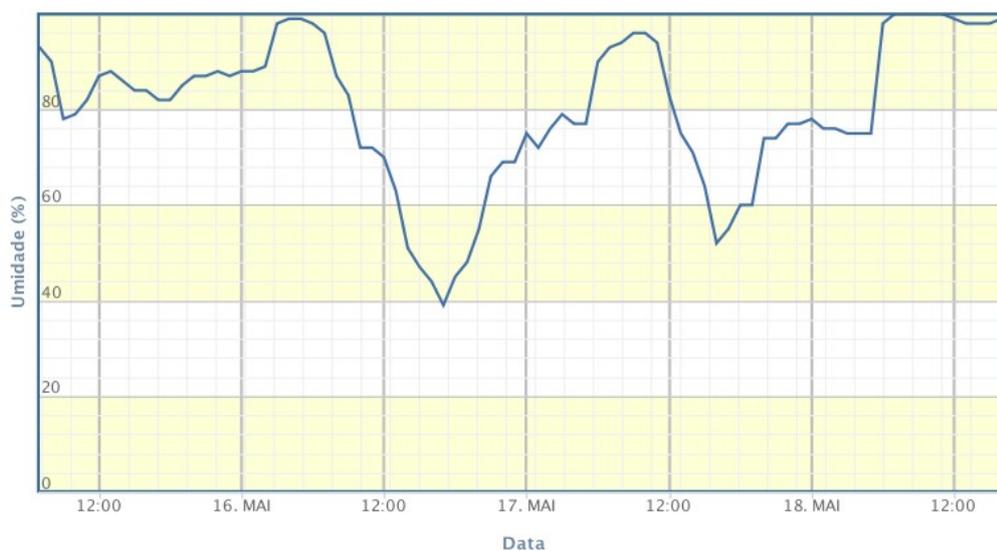
Figura 3: Variação da umidade relativa média do ar para a cidade de Porto Alegre ao longo do ano de 2018.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia, INMET (2019).

A Fig. 3 mostra que ao longo do ano, grandes variações da umidade relativa do ar foram registradas, atingindo valores de 100% em alguns períodos do ano. Além disso, ao longo de um dia também podem ocorrer grandes variações. Para exemplificar esse fenômeno, que é comum em regiões do sul do Brasil, a Fig. 4 mostra a variação da umidade relativa média do ar entre os dias 15 e 18 de maio de 2018, registradas também na cidade de Porto Alegre pelo INMET.

Figura 4: Variação da umidade relativa média do ar para a cidade de Porto Alegre de 15 a 18 de maio de 2018.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia, INMET (2019).

Um dos problemas verificados na produção de produtos em pó é a formação de grumos, decorrente principalmente da absorção de umidade presente no ar. O controle inadequado do ar que é injetado no *spray dryer* pode resultar na aderência do produto nas paredes internas da câmara e no bloqueio de linhas de transporte e ciclones.

Manter condições estáveis de operação é um importante fator na operação da máquina, todavia, o impacto das condições climáticas prejudica a sua operação. A aglomeração de produto não é uma exclusividade do processo de fabricação do leite em pó, achocolatados, cafés instantâneos, etc. Na indústria química, problemas semelhantes são encontrados. A Fig. 5 mostra um exemplo da formação de grumos em um processo de secagem de extrato de tanino de acácia¹.

Figura 5: Exemplo da formação de grumos em processo de secagem de tanino.



As variações das condições do ar levam a alterações de parâmetros da alimentação e temperatura de entrada e saída do ar. Tais alterações reduzem a produtividade e diminuem a eficiência do processo. A prática destas ações também resulta em produtos com conteúdo de umidade abaixo da especificação técnica final.

De acordo com Pisecky (2012), o conteúdo de umidade final é importante do ponto de vista da qualidade do produto em pó e para atingir um padrão. Do ponto de vista econômico, é muito importante operar o mais próximo possível do limite. Em grandes instalações de *spray*

¹ Tanino de acácia é um produto químico utilizado, principalmente no processo de curtimento na fabricação de couro.

drying, cada 0,1% de umidade pode representar uma grande soma de dinheiro no balanço anual.

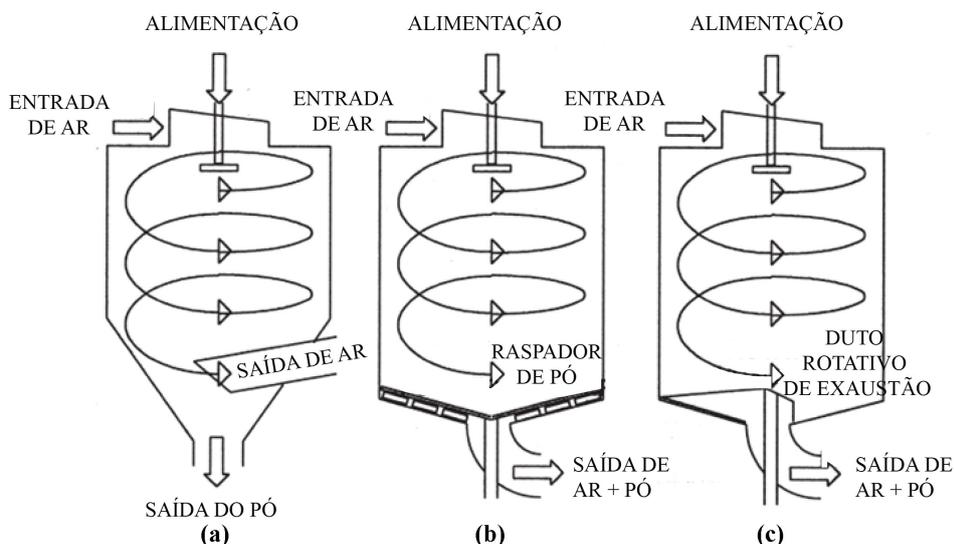
2.3 Componentes de um *spray dryer*

2.3.1 Câmara de secagem

É na câmara de secagem onde o ar aquecido encontra-se com o líquido e a evaporação da água ocorre. O formato da câmara, a localização do dispersor de ar, o dispositivo atomizador, a saída do ar de exaustão e a descarga do produto determinam o padrão do fluxo de ar na câmara de secagem.

Na Fig. 6 são apresentadas algumas configurações de câmaras de secagem de simples estágio com fluxo de ar rotativo.

Figura 6: Diferentes formas construtivas de câmaras de secagem simples estágio.



Fonte: *Handbook of Milk Powder Manufacture* (2012).

Existem diversos modelos de câmaras de secagem no mercado, sendo o mais comum a câmara cilíndrica com cone de 40° a 60° (modelo “a” Fig. 6). Desta maneira o pó, por gravidade pode deixar a câmara (PISECKY, 2012).

Segundo Masters (1991), o conteúdo de umidade de laticínios está relacionado à temperatura do ar de saída, o conteúdo de umidade reduz quando a temperatura de saída aumenta.

Conforme Pisecky (2012), a temperatura de saída deve ser sempre automaticamente controlada para assegurar um pó com constante conteúdo residual de umidade. Se a atomização ocorre por meio de um atomizador de disco rotativo, o ajuste da temperatura de saída é feito alterando a rotação da bomba de alimentação.

Contudo, estudos indicam também uma forte relação entre a umidade do ar na entrada e na saída e a umidade final do produto, ou seja, mesmo com a temperatura de saída constante, o conteúdo de umidade residual do produto é consideravelmente alterado quando se alteram as condições de umidade absoluta e temperatura do ar de entrada.

2.3.2 Atomizador

Atomizador é um dispositivo que provoca a desintegração de líquidos em gotas muito pequenas, todas de tamanhos limitados a valores especificados, com elevada relação de superfície por unidade de volume. O princípio fundamental da desintegração de um líquido consiste em aumentar a sua área superficial até que esta se torne instável e se desintegre (BARBOSA, 2015).

O atomizador aumenta tremendamente a área de superfície do produto concentrado, o qual é exposto ao ar quente. A taxa de evaporação é, então, diretamente proporcional à área de superfície do *spray* e assim, uma atomização fina tem influência positiva em diversas propriedades. O efeito do tamanho, o número de gotículas e sua área de superfície total quando um concentrado é atomizando, supondo um *spray* totalmente homogeneizado é mostrado na Fig. 7. Como pode ser notado, a medida que o diâmetro das gotículas diminui, a área total da superfície do *spray* aumenta.

Figura 7: Efeito da atomização homogênea sobre a superfície do *spray*.

Volume total das gotículas [m ³]	Diâmetro das gotículas	Número por gotícula	Área da superfície das gotículas	Área total das gotículas [m ²]	Relação da área de superfície
0,524	1 m	1	3,14 m ²	3,14	1
0,524	1 cm	1,00E+06	3,14 cm ²	314,16	100
0,524	1 mm	1,00E+09	3,14 mm ²	3141,59	1000
0,524	100 µm	1,00E+12	0,0314 mm ²	31415,93	10000
0,524	1 µm	1,00E+18	3,14 µm ²	3141592,65	1000000

Fonte: *New India Publishing Agency* – NIPA (2015).

O dispositivo utilizado para a atomização é diretamente responsável por muitas vantagens do processo de *spray drying*, podendo-se citar a secagem e um tempo de retenção muito curto, em comparação com outros métodos.

Basicamente existem dois dispositivos que são largamente utilizados para atomização: bicos pressurizados e discos rotativos, sendo que cada um deles possui diferentes configurações de projeto que variam de acordo com as características de cada produto.

O princípio de funcionamento de cada um dos dispositivos está relacionado ao aproveitamento da energia hidráulica e cinética para gerar o *spray* no caso dos bicos e a utilização da energia centrífuga em atomizadores de disco rotativo. As Fig. 8 e Fig. 9 mostram cada um dos dispositivos.

Figura 8: Bico atomizador.



Fonte: *Spraying Systems* do Brasil (2016).

Figura 9: Atomizador de disco rotativo.



Fonte: *Milk Powder Technology - Evaporation and Spray Drying* (2010).

A escolha do tipo de atomizador depende das propriedades (exemplo: concentração e viscosidade) e da quantidade e características desejadas do produto seco (MASTERS, 1997). Por exemplo: atomizadores de disco rotativo são indicados para produtos com alta viscosidade e abrasivos. Por outro lado, bicos pressurizados oferecem maior controle sobre o tamanho da gotícula na atomização.

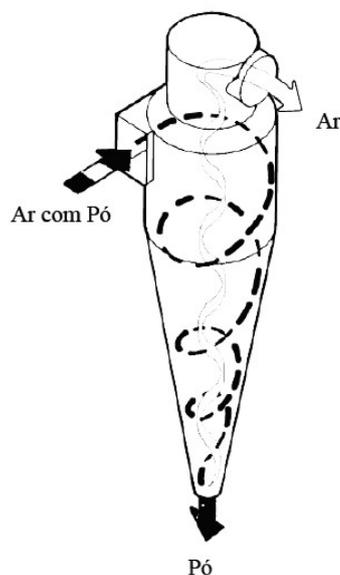
2.3.3 Ciclones

A última etapa do processo de *spray drying* é a separação das partículas de pó do meio de secagem. Grandes partículas são separadas na parte inferior da câmara de secagem enquanto que partículas menores necessitam dos ciclones e também, frequentemente, são necessários sistemas de filtragem instalados no topo destes equipamentos. O princípio de funcionamento de um ciclone pode ser explicado pela formação de um vórtex onde uma força centrífuga atua em cada partícula movendo-as em direção às paredes na parte interna, formando um fluxo espiral do produto em pó e ar. O pó deixa o ciclone na parte inferior

através de uma válvula rotativa enquanto o ar limpo retorna pelo centro do ciclone até sair na parte superior.

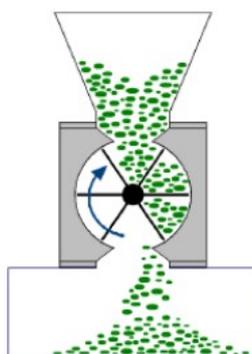
Sistemas de filtragem e lavadores de gases são utilizados após os ciclones para redução das emissões de partículas para o ambiente. A Fig. 10 mostra o princípio de funcionamento de um ciclone e a Fig. 11 o diagrama esquemático de uma válvula rotativa, utilizada como dispositivo de vedação, que é instalada na parte inferior de um ciclone.

Figura 10: Princípio de funcionamento de um ciclone.



Fonte: *Milk Powder Technology - Evaporation and Spray Drying* (2010).

Figura 11: Diagrama esquemático do princípio de funcionamento de uma válvula rotativa.



Fonte: Somsuk, Nisakorn; Wessapan, Teerapot; Teekasap, S. (2011).

2.4 Aplicação de um desumidificador em um *spray dryer*

De acordo com Barbosa (2015), a maioria dos processos de secagem implica na remoção de água por evaporação e, portanto, exige o fornecimento de calor. Ao avaliar a efetividade do processo de secagem, o aproveitamento útil do calor é um dos principais critérios.

A efetividade global do processo de secagem é expressa pela Eq. (2.1):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_a} \quad (2.1)$$

onde T_1 é a temperatura de entrada do ar no *spray dryer*, T_2 é a temperatura de saída, sendo que estas são inerentes ao processo e T_a é a temperatura ambiente, que varia de acordo com o clima do local da instalação.

Segundo Masters (1991), uma possível maneira de economizar energia seria aumentar a temperatura de entrada e reduzir a temperatura de saída. Entretanto, o aumento da temperatura de entrada é limitado, pois o produto em pó pode entrar em ignição e queimar quando exposto a elevadas temperaturas e também a superfície da partícula pode queimar e formar uma casca reduzindo a qualidade do produto final, devido à alteração da cor e sabor, por exemplo.

Além disso, o aumento da temperatura de entrada também não garante a umidade constante na saída, sendo este o principal problema causado pelas variações de umidade do local da instalação. Quanto menor o teor de umidade desejado, menor deverá ser a umidade relativa na saída e isso significa uma temperatura mais alta. Assim, a umidade inicial do ar de secagem desempenha um papel importantíssimo no *spray dryer*, pois, se for elevada demais, a temperatura de saída tem que ser aumentada para compensar essa umidade extra do ar.

Pelas razões apresentadas, pode-se dizer que, se as condições de entrada do ar não estão totalmente estáveis, logo, será mais difícil controlar o pó produzido. O melhor controle da condição do ar na saída possibilita a produção em faixas estreitas de especificação.

Reduzir a umidade relativa do ar através da desumidificação facilita a produção e operação de produtos higroscópicos quando atomizados, no entanto, é importante controlar o nível de umidade do ar em termos absolutos, pois a umidade relativa sofre variações de acordo com a temperatura.

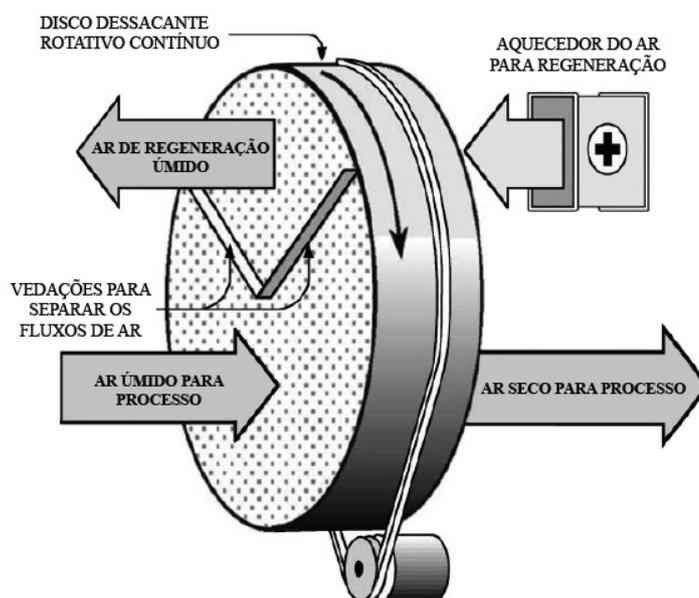
Segundo a ASHRAE (2016), pode-se remover a umidade do ar: resfriando-o para favorecer a condensação da água; aumentando sua pressão total, o que reduz a capacidade do ar de reter a umidade ou atraindo o vapor da água ao passar por um líquido ou sólido dessecante.

O processo de desumidificação por adsorção utilizando um equipamento com um sólido dessecante difere do processo de desumidificação por resfriamento. Ao invés de resfriar o ar para condensar sua umidade, sólidos dessecantes atraem a umidade do ar criando uma área de baixa pressão na superfície do material. Segundo Harriman (2002), a pressão exercida pela água no ar é maior, então as moléculas de água se movem do ar para o dessecante e o ar é desumidificado. Ainda segundo Harriman (2002), o processo de adsorção também eleva a temperatura do fluxo de ar que é desumidificado, reduzindo a quantidade de energia necessária para aquecê-lo.

Dessecantes sólidos, como sílica gel, zeólitas, alumina ativada ou sais higroscópicos são geralmente utilizados para desumidificar grandes volumes de ar úmido e são continuamente reativados (ASHRAE, 2016).

A Fig. 12 mostra o princípio de funcionamento de equipamentos rotativos que utilizam sólidos dessecantes para desumidificação do ar.

Figura 12: Princípio de funcionamento de desumidificadores com sólido dessecante.



Fonte: ASHRAE HVAC Systems and Equipment (2016).

Em desumidificadores, como o apresentado na Fig. 12, o ar úmido passa pelo disco com estrutura dessecante que, quando ativo, tem pressão de vapor abaixo da do ar úmido. Essa pressão diferencial move as moléculas de água presente no ar em direção ao material dessecante. Antes de ficar totalmente carregado com umidade, o disco é regenerado (seco) por ar aquecido, o que aumenta a pressão de vapor sob o material dessecante acima do ar circundante. Com o diferencial de pressão de vapor agora reverso, o vapor d'água se move do material dessecante para outro fluxo de ar, chamado ar de regeneração, que carrega o ar úmido para fora do equipamento.

Segundo a ASHRAE (2016), equipamentos de regeneração contínua são os tipos mais utilizados para aplicações com grande carga de umidade, como sistemas de controle para construções e processos industriais.

Na seção 2.5 será apresentado o equacionamento para encontrar a vazão de ar de secagem e o calor necessário para operação de *spray dryers* e, em seguida, as equações para dimensionamento de um desumidificador de material dessecante que atenda a vazão de ar deste processo.

2.5 Processo e dimensionamento

As equações mostradas a seguir são baseadas em fabricantes de *spray dryers*, na ASHRAE HVAC Systems and Equipment (2016) e na ASHRAE Standard 139 Method of Testing for Rating Desiccant Dehumidifiers Utilizing Heat for the Regeneration Process (2007).

2.5.1 Ar de secagem

A taxa de evaporação da água do produto no *spray dryer*, TXE , é dada pela diferença entre a taxa de alimentação, TXA , e a taxa de saída do produto do *spray dryer*, TXS , conforme a Eq. (2.2).

$$TXE = TXA - TXS \quad (2.2)$$

A taxa de saída do produto, TXS é dada pela Eq. (2.3).

$$TXS = TXA \frac{TSL}{TSP} \quad (2.3)$$

onde TSL é o teor de sólidos do produto líquido na alimentação e TSP é o teor de sólidos residual no produto em pó.

A quantidade de ar necessária para evaporar uma determinada quantidade de água que está contida no líquido pode ser encontrada utilizando a Eq. (2.4), onde se calcula individualmente o calor necessário de cada um dos componentes para sua temperatura de entrada e saída, compensando as perdas de calor.

$$A = \frac{\Sigma Q}{T_1 ca_1 - T_2 ca_2 + y_a(T_1 cv_1 - T_2 cv_2)} \quad (2.4)$$

onde A é a quantidade de ar necessária, Q é o somatório de todos os calores necessários de cada componente, T_1 é a temperatura do ar de entrada, ca_1 é o calor específico do ar em T_1 , T_2 é a temperatura do ar de saída, ca_2 é o calor específico do ar em T_2 , y_a é a umidade absoluta do ar atmosférico e cv_1 e cv_2 são os calores específicos do vapor d'água nas temperaturas T_1 e T_2 respectivamente.

Pelo fato dos maiores valores estarem associados ao calor de evaporação e também pelas perdas por radiação, a Eq. (2.4) pode ser simplificada e a quantidade de ar necessária também poderá ser encontrada a partir da Eq. (2.5).

$$A = \frac{TXE (597,3 + cv_2 T_2 - T_f) + A_{sd} K (T_2 - T_1)}{T_1 ca_1 - T_2 ca_2} \quad (2.5)$$

onde T_f é a temperatura do líquido na alimentação, A_{sd} é a área de superfície do *spray dryer* e K é um valor fixo estimado de perda de calor por radiação e convecção em câmaras de secagem que, segundo Pisecky (2012), um valor de $K = 12,6 \text{ kJ/m}^2\text{h}$ ($3 \text{ kcal/m}^2\text{h}$) é tipicamente utilizado.

Da mesma maneira, a quantidade de calor necessária para o aquecimento do ar desde T_a até a temperatura T_1 pode ser determinada com a Eq. (2.6).

$$Q = \frac{A}{1 + y_a} [T_1 ca_1 - T_a ca_a + y_a(T_1 cv_1 - T_a cv_a)] \quad (2.6)$$

em que A é calculada a partir da Eq. (2.5), T_a é a temperatura ambiente e ca_a é o calor específico do ar em T_a .

2.5.2 Desumidificação

A capacidade de remoção de umidade (MRC) de um desumidificador pode ser determinada a partir da Eq. (2.7).

$$MRC = A_d \rho_d (y_{de} - y_{ds}) \quad (2.7)$$

em que A_d é a vazão de ar de processo (ar que deve ser desumidificado), ρ_d é massa específica do ar e y_{de} e y_{ds} são as umidades absolutas do ar na entrada e saída, respectivamente.

Desta mesma maneira, a umidade que é adicionada ao ar na unidade de regeneração do desumidificador é calculada a partir da Eq. (2.8).

$$MRR = A_r \rho_r (y_{rs} - y_{re}) \quad (2.8)$$

onde A_r é a vazão de ar da unidade de regeneração, ρ_r é massa específica do ar e y_{re} e y_{rs} são as umidades absolutas do ar na entrada e saída, respectivamente.

Segundo a ASHRAE (2007), existe uma razão de massas que deve ser respeitada entre a unidade de desumidificação e a de regeneração em equipamentos dessecantes. Essa relação é apresentada na Eq. (2.9).

$$0,95 < \frac{MRC}{MRR} < 1,05 \quad (2.9)$$

Para regeneração do ciclo termodinâmico da roda dessecante deve-se satisfazer o balanço de energia apresentado na Eq. (2.10).

$$Q_{reg} = Q_{total} = Q_{sens} + Q_{lat} \quad (2.10)$$

em que Q_{reg} é a energia térmica que regenera o ciclo e Q_{total} é o resultado da soma dos calores sensível e latente, Q_{sens} e Q_{lat} , respectivamente.

3 METODOLOGIA

A utilização da adsorção como tecnologia para desumidificação do ar que é injetado na câmara de secagem é nova e, por vezes, desconhecida por empresas que utilizam *spray drying* no seu processo produtivo.

Em geral, os *spray dryers* requerem elevado investimento inicial, contudo, são máquinas que apresentam longa vida útil e por essa razão, equipamentos adquiridos no passado não possuem nenhuma tecnologia para o gerenciamento das condições do ar de secagem. Apesar disso, esses desumidificadores podem ser acoplados a processos já existentes sem grandes alterações.

A partir da aplicação dos equacionamentos apresentados no capítulo anterior analisou-se um processo de secagem real e os resultados que podem ser obtidos com a instalação de um desumidificador de roda com sólido dessecante na linha de injeção do ar da câmara de secagem.

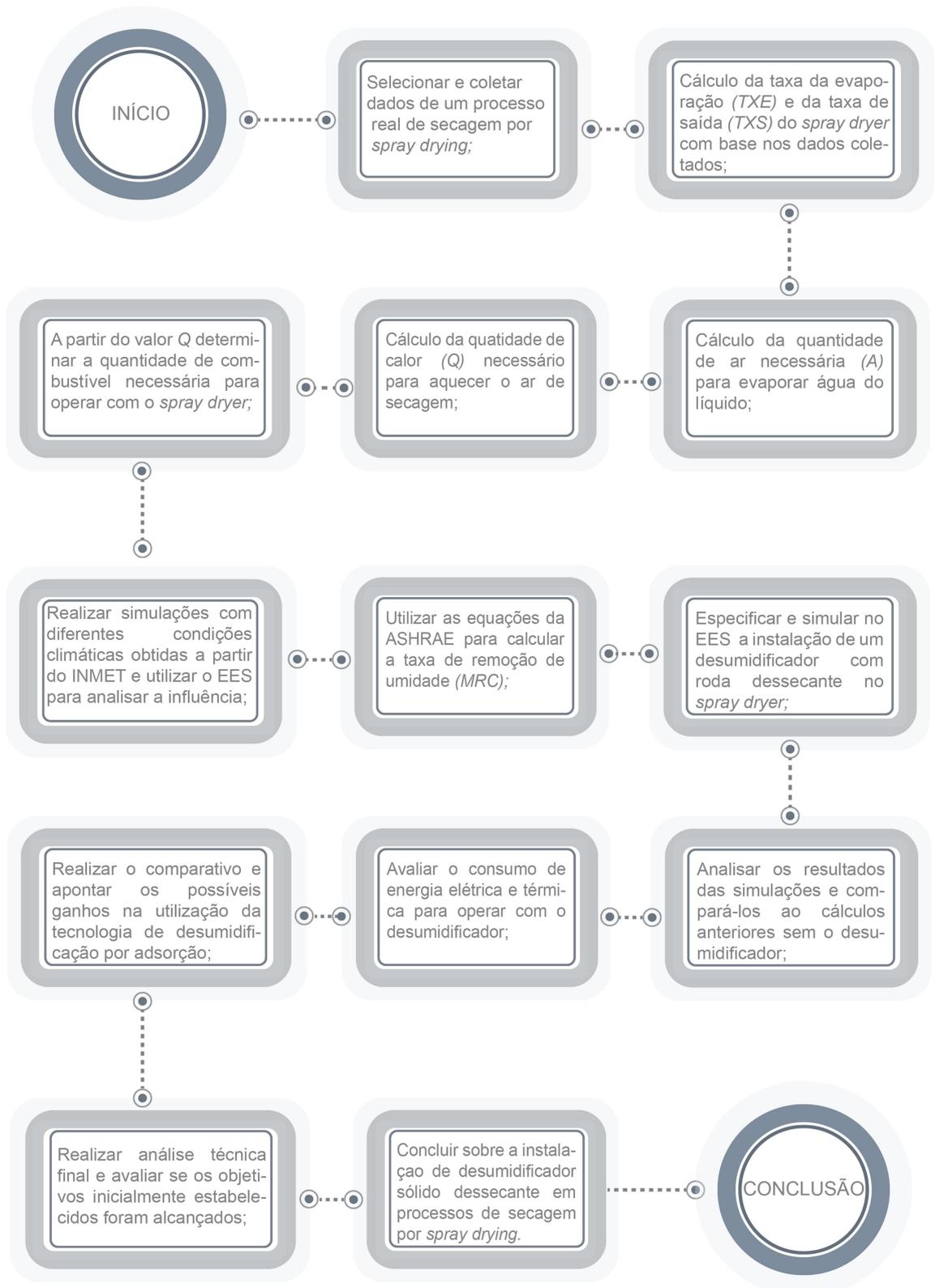
O consumo total de energia de um desumidificador por adsorção, como apresentado na Fig. 12, é dado pela soma das potências de acionamento dos ventiladores que fornecem o ar de processo e o ar de regeneração, pela potência do motor que mantém a roda dessecante em movimento rotativo contínuo e pela energia térmica consumida pelo aquecedor do ar que regenera o ciclo.

A regeneração do ar é um ponto importante da análise, pois necessita de uma fonte de fornecimento de calor para que a desumidificação possa acontecer de forma contínua. Desta maneira, a partir de cálculos e balanços de energia foram realizadas comparações do consumo de energia térmica com e sem o desumidificador.

Para realização dos cálculos e das simulações do processo de secagem de forma confiável e prática, utilizou-se o software *Engineering Equation Solver* (EES). A partir deste *software* foi possível obter as propriedades físicas das substâncias do processo, como por exemplo: ar e água. Com esta metodologia foi possível dedicar maior tempo na análise dos resultados devido ao rápido processamento dos dados.

Para o desenvolvimento deste trabalho, primeiramente, foi elaborado um fluxograma contendo as etapas necessárias para avaliar um processo de secagem. Este fluxograma é apresentado na Fig. 13.

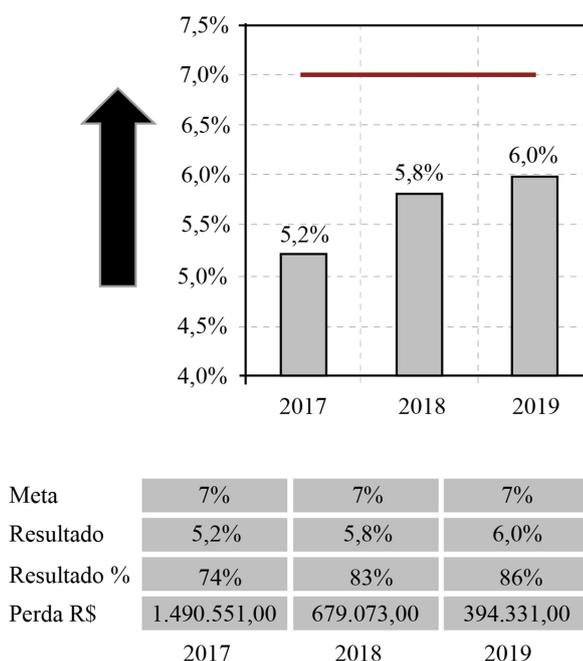
Figura 13: Fluxograma para o desenvolvimento do trabalho.



Os parâmetros de operação e dados de entrada de processo utilizados neste trabalho para as simulações foram coletados num processo de secagem por *spray drying* em uma indústria da região metropolitana de Porto Alegre. O *spray dryer* analisado utiliza uma câmara de secagem de simples estágio e a atomização ocorre por meio de um disco rotativo.

Indicadores gerenciais da instalação industrial analisada mostram que entre os anos de 2017 e 2018 as perdas acumuladas em dois *spray dryers* em função da falta de controle da umidade residual final do produto em pó ultrapassaram R\$ 2.000.000,00. Neste processo, a umidade residual do produto em pó deveria atingir a meta de 7 %, com a especificação final permitindo um máximo de 7,5 %. Contudo, a produção da fábrica enfrenta dificuldades para operar e garantir que o pó mantenha uma umidade constante e, por essa razão, a umidade residual é mantida abaixo do máximo permitido pela especificação. Nenhum dos dois *spray dryers* possui desumidificadores para gerenciar as condições do ar de secagem. A Fig.14 mostra um dos indicadores divulgados pela empresa.

Figura 14: Indicador de prejuízo por conta da umidade do produto.

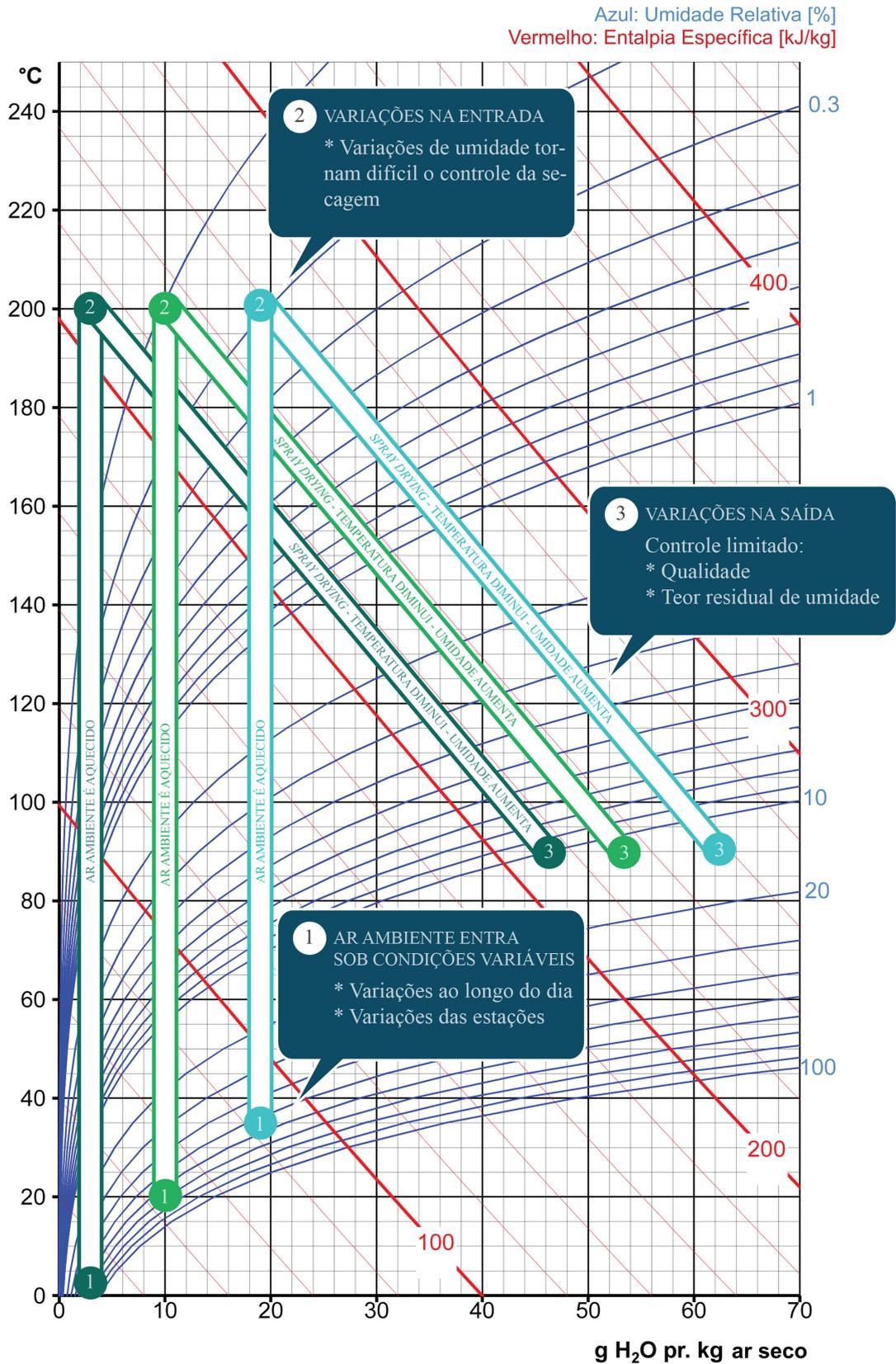


Os dados apresentados na Fig.14, para o ano de 2019, são de janeiro a julho e mostram perdas próximas a R\$ 400.000,00. Como já mencionado, o clima úmido é prejudicial para a secagem, pois requer frequentes ajustes em parâmetros entrada e saída do *spray dryer*. Esse ajuste é feito por meio da alteração da rotação da bomba de alimentação. Por exemplo: o aumento da rotação da bomba de alimentação é diretamente proporcional à taxa de

alimentação TXA e diminui a temperatura de saída T_2 , ou seja, para aumentar a temperatura de saída, é necessário reduzir a rotação da bomba e, por consequência, a TXA é reduzida.

Segundo dados do INMET, entre janeiro e agosto de 2019 foram registradas temperaturas máximas e mínimas de 38°C e $2,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente, para a cidade de Porto Alegre e para esse mesmo período a umidade relativa do ar teve amplitudes registradas de 33% a 100%. A Fig. 15 apresenta, por meio da utilização do diagrama de Mollier, como três diferentes condições do ar ambiente na entrada afetam a condição de saída do produto em pó final.

Figura 15: Impacto da variação climática no *spray dryer*.



No processo de secagem analisado neste trabalho, as temperaturas de entrada e saída do *spray dryer* são, respectivamente, 200 °C e 90 °C. A Fig. 15 mostra três linhas que representam variações de umidade e temperatura. Como já mencionado, a umidade do ar na saída afeta a umidade residual do produto final. Por essa razão, busca-se, através da utilização do desumidificador com roda dessecante, eliminar essas flutuações do clima e manter a umidade na entrada constante para manter a especificação da umidade residual do produto pó em 7%.

Aquecer o ar representa o maior consumo de energia térmica do processo e a redução do consumo do combustível utilizado para aquecer o ar é um fator importante na decisão de investimento em novos equipamentos. Por essa razão, o incremento da temperatura obtido na saída da roda dessecante é um dos pontos explorados na análise dos resultados.

A instalação atual analisada possui trocadores de calor que utilizam vapor e óleo térmico, instalados em série na descarga do ventilador para aquecer o ar de secagem. A Fig. 16 mostra um diagrama esquemático simplificado do *spray dryer* e a Fig. 17 detalha o sistema de aquecimento onde estão instalados estes trocadores de calor.

Figura 16: Diagrama esquemático simplificado do *spray dryer*.

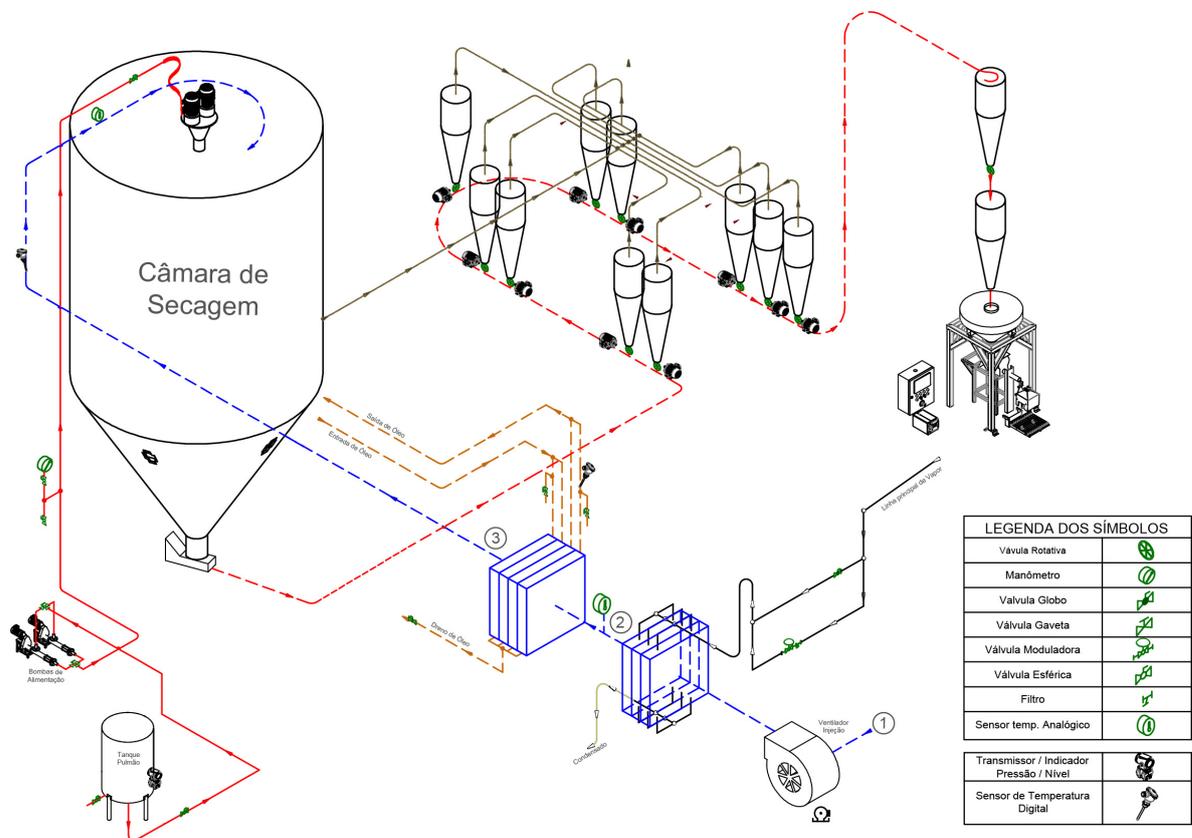
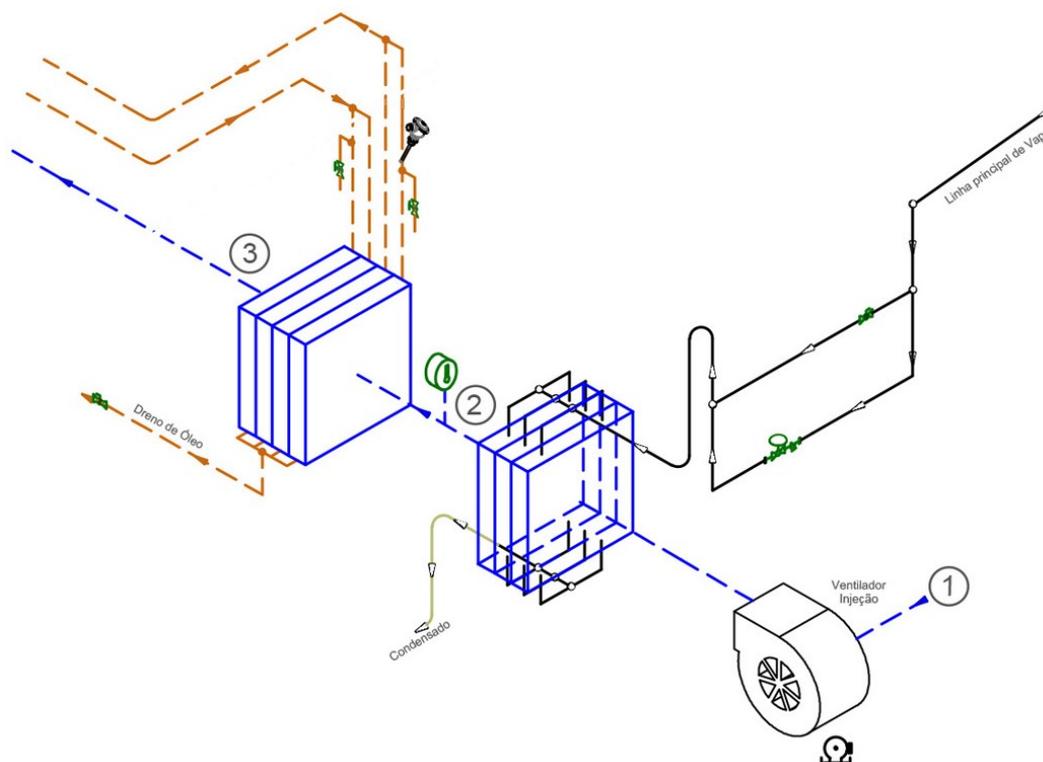


Figura 17: Diagrama esquemático do sistema de aquecimento do ar de secagem.



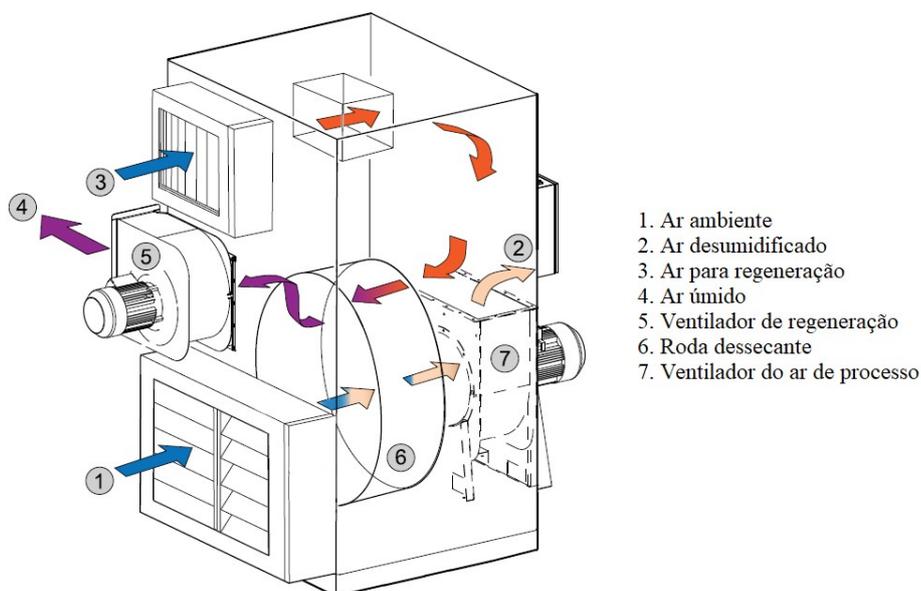
Na Fig.17 o ar ambiente é captado pelo ventilador de injeção no ponto 1, passa pelo trocador de calor que utiliza vapor para pré-aquecer o ar no ponto 2 e, finalmente, atinge a temperatura de entrada T_1 no ponto 3, após passar pelo trocador de calor com óleo térmico.

Os cálculos para dimensionamento do desumidificador foram realizados a partir dos dados de processo e projeto do *spray dryer* da instalação. A indústria possui dois processos de secagem por *spray drying* de mesma capacidade e este estudo poderá ser aplicado para qualquer um destes equipamentos assim como para outros processos que utilizam parâmetros e condições de entrada semelhantes.

A partir da vazão mássica de ar necessária para secar o produto, das variações climáticas que ocorrem ao longo do ano e da condição desejada para o ar de secagem após a desumidificação é possível dimensionar um equipamento que atenda o processo. Os cálculos foram realizados considerando a instalação do desumidificador no ponto 1 e prevê a substituição do ventilador de injeção apresentado na Fig. 17.

Quanto maior for a vazão de ar e a variação da umidade absoluta entre a entrada e a saída do desumidificador, maior será a máquina para atender a taxa de remoção de umidade, *MRC*. A Fig. 18 mostra como ocorre o escoamento do ar em desumidificadores com roda de sólido dessecante e como esses equipamentos são tipicamente construídos.

Figura 18: Escoamento do ar em um desumidificador com roda de sólido dessecante.



Fonte: Manual de operação desumidificador MX² Plus Munters Europe (2015).

A utilização da tecnologia de desumidificação por adsorção em *spray dryers* ainda é pouco conhecida, mas sua avaliação é interessante, pois difere dos métodos mais comuns de desumidificação que resfriam o ar abaixo da temperatura de orvalho para desumidificar e em seguida aquece-se o ar até a temperatura de entrada.

O princípio de funcionamento da roda dessecante é baseado na diferença da pressão de vapor da superfície do material dessecante e na pressão de vapor do ar. Na adsorção, a roda dessecante aumenta o seu conteúdo de umidade e libera calor latente, elevando a temperatura do ar. Isso reduz o ΔT entre a saída do desumidificador e a temperatura de entrada T_1 do *spray dryer*. A regeneração do ciclo ocorre por meio da utilização de um ventilador centrífugo e um aquecedor de ar, que utiliza como fluido quente o vapor, óleo térmico, condensado de vapor, ou possíveis combinações, por exemplo. O escoamento do ar quente através da roda aumenta a pressão de vapor na superfície do material dessecante, retirando sua umidade. A utilização de rodas dessecantes permite remoções de até 15g H₂O/kg de ar seco sem a necessidade de pré ou pós resfriamento.

Conhecer as variáveis do processo, compreender o funcionamento do *spray dryer* e estudar o local da instalação foram necessários para dimensionar corretamente o desumidificador, realizar os cálculos de produtividade, consumo energético e determinar os resultados.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os dados e cálculos completos do processo de secagem por *spray drying* apresentado no capítulo anterior. A utilização de dados reais de produção busca mensurar os ganhos que podem ser obtidos com a utilização de desumidificadores com sólido dessecante em *spray dryers*. Dados operacionais e de processo foram obtidos com engenheiros de processo e pessoas ligadas à produção de uma empresa situada na região metropolitana de Porto Alegre, enquanto os dados de clima e localização foram baixados a partir dos dados fornecidos pelo INMET. As informações técnicas sobre o funcionamento e performance de desumidificadores existentes e comerciais no Brasil para esta área de aplicação foram obtidas por contato telefônico e e-mail com o departamento de engenharia do fabricante Munters assim como também os custos para aquisição no ano de 2019.

4.1 Análise do clima local

Para realizar a análise do processo e especificar um equipamento que atenda a necessidade, primeiramente foi necessário estabelecer as condições de entrada do desumidificador. Para isso, foram analisados os dados medidos pela estação automática do INMET ao longo do ano, no período de verão e inverno. Os dados analisados são do período de 01/01/19 a 25/08/19 em que 24 medições diárias de temperatura, umidade relativa, ponto de orvalho e pressão atmosférica foram registradas.

A instalação industrial estudada opera 24 h/dia e a partir dos dados registrados pela estação automática do INMET foram identificadas as máximas variações de temperatura e umidade. Também foram identificados os dias mais quentes e úmidos para cálculo da umidade absoluta e ao final foi calculada a média aritmética para todo o período. O objetivo desta análise foi identificar as amplitudes, as máximas e as mínimas para a temperatura e a umidade. Assim, foi possível encontrar uma melhor solução técnica que atenda o processo de maneira adequada, mas que não seja superdimensionada com o risco de tornar o projeto inviável economicamente.

As datas e as respectivas medições selecionadas são apresentadas na Tab.1.

Tabela 1: Variações do clima de Janeiro e Agosto de 2019.

Máximos e mínimos de Temperatura e Umidade - Estação do INMET

Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)		
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.
02/01/2019	19	38	38,2	37,2	46	48	45	24,5	25	24,2	999,9	1001,10	999,9
31/01/2019	20	23,8	31,2	23,3	100	100	66	23,7	24,7	22	1007,3	1007,5	1004,4
21/02/2019	19	34,4	35,4	34,1	33	47	28	15,8	21,4	13,4	1007,1	1007,4	1007
05/06/2019	10	10,3	10,5	10,1	100	100	100	10,3	10,5	10,1	1019,6	1019,6	1019,1
07/07/2019	10	2,3	2,9	2,3	92	92	90	1,1	1,6	1,1	1024,2	1024,3	1023,9

Dias Úmidos - Estação do INMET

Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)		
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.
14/01/2019	22	30,1	31	30,1	70	70	66	23,9	24,2	23,7	1005,5	1005,5	1004,8
16/01/2019	14	31	31,4	29,7	71	76	70	25	25,8	24,5	1003,8	1004,1	1003,6
24/01/2019	18	30,6	30,6	28,2	73	80	72	25,1	25,5	23,4	1009,7	1010,4	1009,7
01/02/2019	13	30,9	30,9	28,9	70	78	69	24,6	25,7	23,3	1007,1	1007,5	1007,1

Média de 01/01/19 a 25/08/19 - Estação do INMET

	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)		
	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.
MÉDIA DO PERÍODO 01/01/19 A 25/08/19	20,3	20,9	19,8	80,6	83,1	78,1	16,5	17,0	16,1	1010,8	1011,0	1010,5

Fonte: INMET (2019).

A partir da Tab.1 utilizou-se o software *Engineering Equation Solver* (EES) para calcular a umidade absoluta. Com os resultados em umidade absoluta é possível simular a condição do ar para processo de desumidificação e secagem. Para o cálculo foram utilizadas as colunas da medição realizada no instante da hora da Tab.1 e os resultados são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2: Cálculo da umidade absoluta para as variações do clima de Janeiro a Agosto de 2019.

Máximos e mínimos de Temperatura e Umidade - Estação do INMET						
Data	Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Umidade (kg/kg)	Pto. Orvalho (°C)	Pressão (hPa)
	UTC	Inst.	Inst.	Inst.	Inst.	Inst.
02/01/2019	19	38	46	0,019740	24,5	999,9
31/01/2019	20	23,8	100	0,018650	23,7	1007,3
21/02/2019	19	34,4	33	0,011290	15,8	1007,1
05/06/2019	10	10,3	100	0,007738	10,3	1019,6
07/07/2019	10	2,3	92	0,004045	1,1	1024,2
Dias Úmidos - Estação do INMET						
Data	Hora	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Umidade (kg/kg)	Pto. Orvalho (°C)	Pressão (hPa)
	UTC	Inst.	Inst.	Inst.	Inst.	Inst.
14/01/2019	22	30,1	70	0,018910	23,9	1005,5
16/01/2019	14	31	71	0,020280	25	1003,8
24/01/2019	18	30,6	73	0,020280	25,1	1009,7
01/02/2019	13	30,9	70	0,019720	24,6	1007,1
Média de 01/01/19 a 25/08/19 - Estação do INMET						
		Temperatura (°C)	Umidade (%)	Umidade (kg/kg)	Pto. Orvalho (°C)	Pressão (hPa)
		Inst.	Inst.	Inst.	Inst.	Inst.
MÉDIA DO PERÍODO 01/01/19 A 25/08/19		20,3	80,6	0,011770	16,5	1010,8

Os resultados apresentados na Tab. 2 mostram que o dia mais seco do período de Janeiro a Agosto foi em 07/07/19, com uma umidade absoluta de 0,004045 kgH₂O/kg ar seco, enquanto os dias mais úmidos foram 16/01/19 e 24/01/19, quando foi registrada a mesma umidade absoluta de 0,020280 kgH₂O/kg ar seco. Importante notar que o mês de Janeiro, apesar de mais quente e aumentar a eficiência do processo, apresenta a umidade absoluta máxima, desfavorecendo o controle da secagem.

O resultado médio de todas as horas do período, apresentado ao final da Tab.2, mostra que a umidade absoluta média local é de 0,011770 kgH₂O/kg ar seco, contudo, os cálculos realizados para o dimensionamento do desumidificador consideraram todas as situações para que no período de maiores flutuações a umidade possa ser mantida constante o máximo possível, dentro dos limites do equipamento.

4.2 Dados de processo e características da instalação industrial

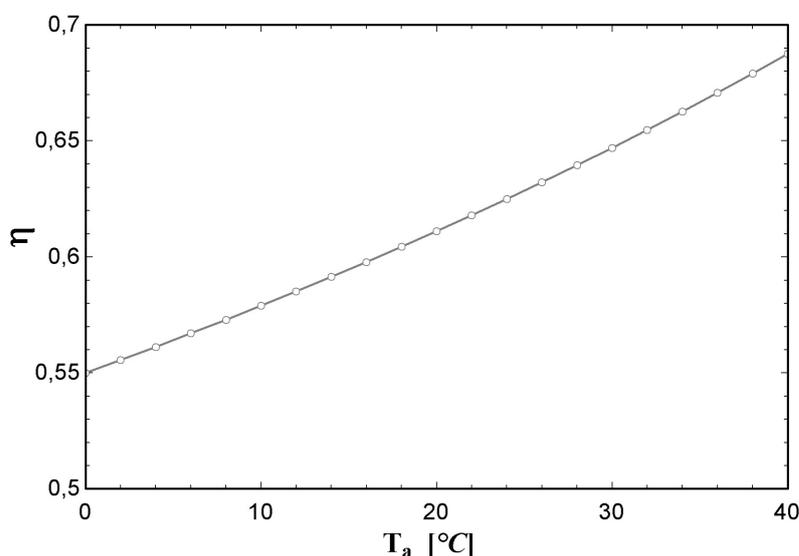
Os dados apresentados nesta seção representam valores fiéis à capacidade máxima produtiva de um *spray dryer* de uma instalação industrial em que a câmara de secagem tem forma construtiva conforme aquela apresentada no modelo (a) da Fig. 6 e layout de instalação

descrito no diagrama da Fig. 16. A partir dos dados de entrada e das especificações finais do produto é possível calcular a eficiência do *spray dryer* pela Eq. (2.1), a taxa de evaporação do *spray dryer* (TXE) utilizando Eq. (2.2) e a taxa de saída (TXS) que representa a quantidade pó produzida pelo equipamento, apresentada na Eq. (2.3).

Conforme as Tab. 1 e Tab. 2, ocorreram variações de temperatura no inverno e verão entre $2,3^{\circ}\text{C}$ e 38°C .

Considerando $T_1 = 200^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 90^{\circ}\text{C}$ e T_a variando entre 0°C a 40°C , os resultados da Eq. (2.1) são apresentados na Fig. 19.

Figura 19: Efetividade global do *spray dryer* - Variação $T_a \times \eta$.



Apesar da efetividade do *spray dryer* ser maior em dias quentes, conforme apresentado na Fig.19, através da Tab.2 é possível verificar também que dias quentes geralmente apresentam maior umidade absoluta do ar.

Reduzir a umidade para evitar as flutuações às quais estão sujeitas o ar injetado na câmara de secagem e ainda fornecer uma temperatura do ar de entrada maior para o processo são os pontos explorados na análise de instalação do desumidificador com sólido dessecante.

Para determinação de TXE e TXS foi necessário o conhecimento dos valores de entrada do processo, tais como: taxa de alimentação de líquido na bomba (TXA), teor de sólidos no líquido (TSL) e o teor de sólidos do produto final em pó (TSP). A partir destes dados foram aplicadas as Eq. (2.2) e Eq. (2.3).

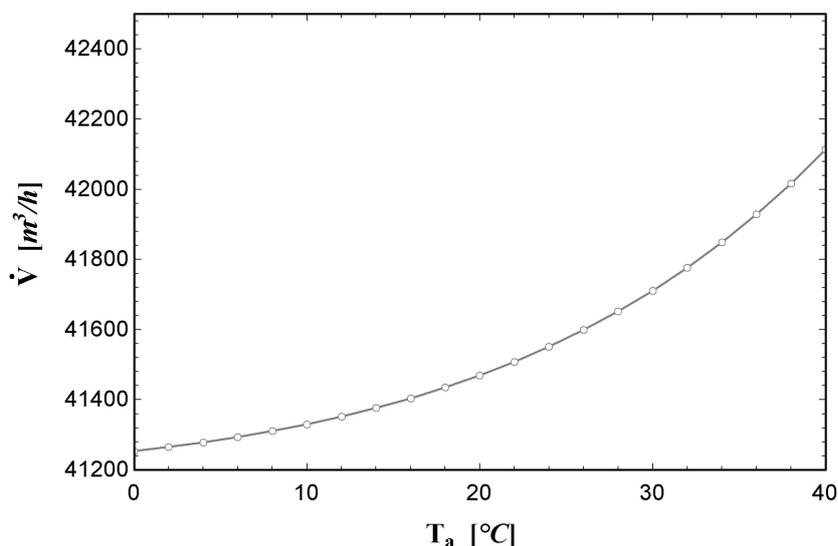
O processo analisado tem uma capacidade de produção máxima para $TXA = 3400$ kg/h, $TSL = 0,48$ e $TSL = 0,93$. Os resultados obtidos foram: $TXE = 1645$ kg/h e $TXS = 1755$ kg/h.

A partir do cálculo da TXE , que é a quantidade de água evaporada do produto líquido, sabendo-se também a temperatura do líquido na alimentação (T_f), as dimensões da câmara de secagem existente para calcular a sua área de superfície (A_{sd}) e as devidas propriedades do ar, em seguida, foi possível determinar a vazão mássica de ar necessária para realizar a secagem (A), utilizando os dados da Tab. 2 e a Eq. (2.5).

Sendo constantes os calores específicos do ar e vapor d'água em T_1 e T_2 : $ca_1 = 1,025$ kJ/kg°C (0,2449 kcal/kg°C), $ca_2 = 1,011$ kJ/kg°C (0,2414 kcal/kg°C) e $cv_2 = 1,886$ kJ/kg°C (0,4504 kcal/kg°C). A temperatura do líquido $T_f = 60$ °C e $A_{sd} = 350$ m² são características da instalação, o resultado obtido para a vazão mássica de ar de secagem foi: $A = 30646$ kg/h.

Para avaliar a necessidade máxima real do fornecimento de ar para secagem durante o ano foi calculada a máxima vazão volumétrica entre as variações de temperatura de inverno e verão. Os resultados são apresentados na Fig. 20.

Figura 20: Vazão volumétrica de ar do *spray dryer*- Variação T_a x \dot{V} .



Admitindo-se uma temperatura ambiente máxima $T_a = 40$ °C, a Fig. 20 mostra que a vazão volumétrica de ar necessária para a secagem na temperatura de entrada T_1 é 42.120 m³/h. Para a seleção de um modelo de desumidificador que atenda o processo, a vazão volumétrica \dot{V} é o valor utilizado, contudo, em casos onde a vazão mássica é solicitada, deve-

se fazer a correção utilizando a massa específica do ar na temperatura ambiente para selecionar o equipamento.

4.3 Energia térmica necessária para aquecer o ar de secagem na temperatura ambiente sem desumidificação

A energia empregada para aquecer o ar de secagem representa o maior consumo de energia térmica do processo e, dependendo do seu custo de geração, pode representar a maior despesa da planta.

Os resultados da energia térmica empregada para o aquecimento do ar de secagem sem desumidificação foram denominadas ideal e real, sendo ideal, resultados onde são desprezadas perdas e real quando a eficiência do sistema térmico é considerada no cálculo.

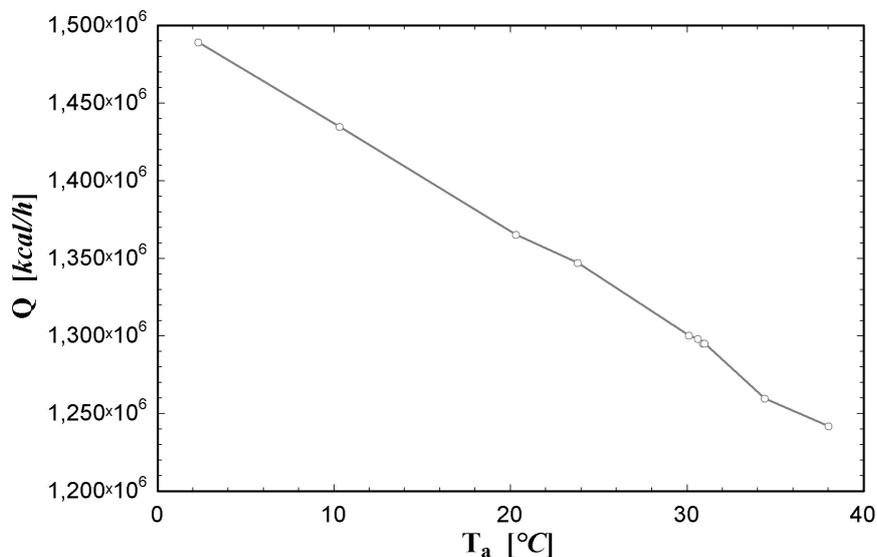
A energia térmica ideal necessária para aquecer o ar de secagem (Q) foi calculada utilizando os dados Tab. 2 e a Eq. (2.6). Os resultados são apresentados na Tab. 3 e na Fig. 21.

Tabela 3: Energia térmica ideal necessária para aquecer o ar úmido - Variação $T_a \times Q$.

T_a [°C]	UR T_a [-]	$\frac{dpT_a}{T_a}$ [°C]	P_{atm} [Pa]	A [kg/h]	Y_a [kg/kg]	c_{a_a} [kcal/kg°C]	c_{a_s} [kJ/kg°C]	c_{v_a} [kcal/kg°C]	c_{v_s} [kJ/kg°C]	Q [kcal/h]	Q [kW]
2,3	0,92	1,1	102420	30646	0,004045	0,2403	1,006	0,4441	1,859	1,49E+06	1733
10,3	1	10,3	101960	30646	0,007738	0,2403	1,006	0,4445	1,861	1,44E+06	1675
20,3	0,806	16,5	101080	30646	0,011770	0,2404	1,007	0,445	1,863	1,37E+06	1593
23,8	1	23,7	100730	30646	0,018650	0,2404	1,007	0,4452	1,864	1,35E+06	1570
30,1	0,7	23,9	100550	30646	0,018910	0,2405	1,007	0,4456	1,866	1,30E+06	1512
30,6	0,73	25,1	100970	30646	0,020280	0,2405	1,007	0,4456	1,866	1,30E+06	1512
30,9	0,7	24,6	100710	30646	0,019720	0,2405	1,007	0,4457	1,866	1,30E+06	1512
31	0,71	25	100380	30646	0,020280	0,2405	1,007	0,4457	1,866	1,30E+06	1512
34,4	0,33	15,8	100710	30646	0,011290	0,2405	1,007	0,4459	1,867	1,26E+06	1465
38	0,46	24,5	99990	30646	0,019740	0,2405	1,007	0,4461	1,868	1,24E+06	1442

Assim como o cálculo da vazão mássica, apresentado na Fig.20, a Tab.3 mostra os diferentes resultados de Q de acordo com as variações climáticas da Tab.2. Notou-se pequena variação dos calores específicos do ar e do vapor d'água, c_a e c_v em função da temperatura ambiente. A Fig. 21 mostra de forma gráfica os resultados de Q .

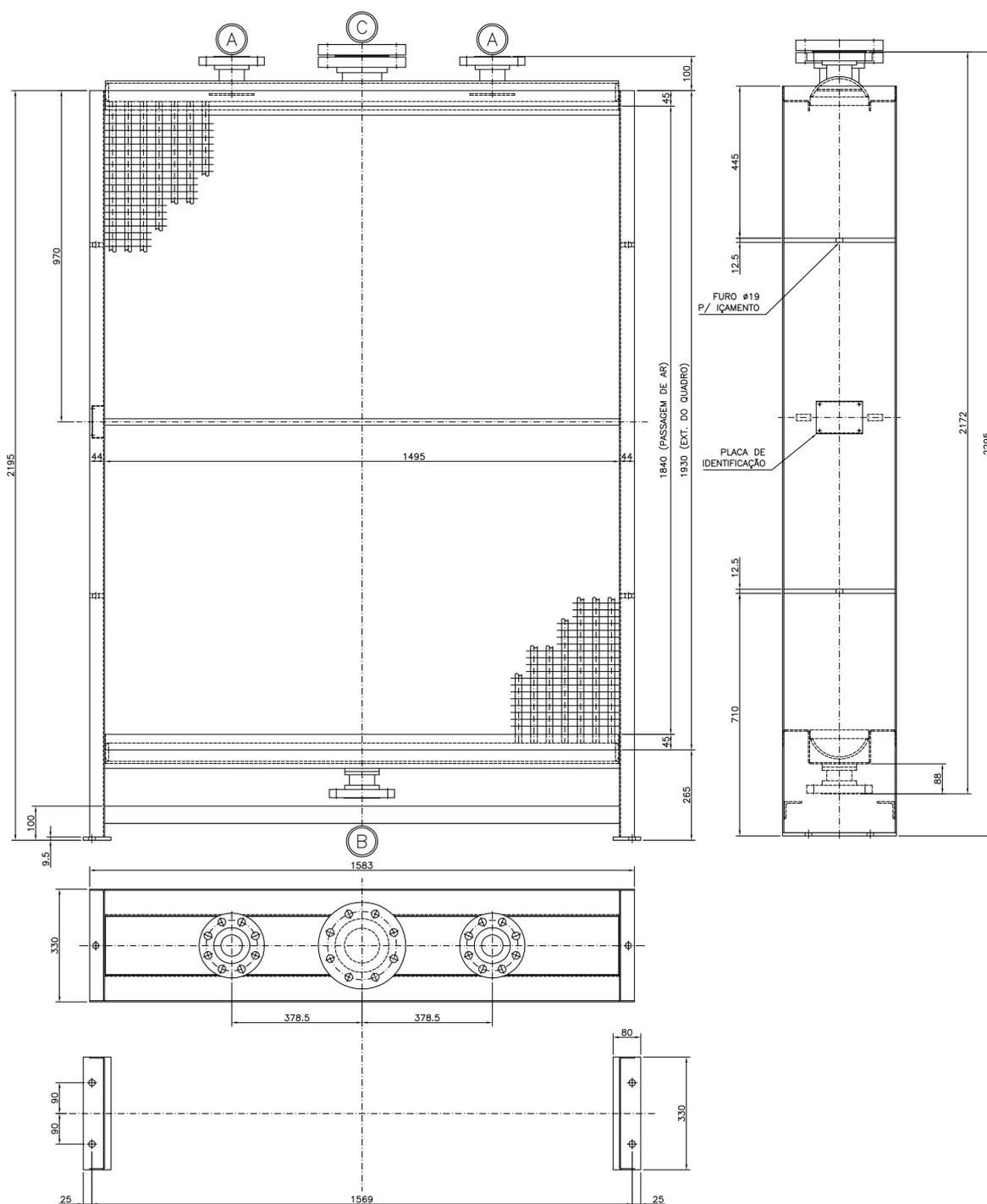
Figura 21: Energia térmica ideal sem desumidificação - Variação $T_a \times Q$.



A Fig. 21 mostra que para o período de inverno ou dias frios, em temperaturas próximas a 0°C a energia térmica necessária para aquecer o ar até a temperatura de entrada $T_I = 200^\circ\text{C}$ pode chegar próximo a $1,5 \times 10^6$ kcal/h (1745 kW). Contudo, para que fosse possível determinar o consumo de combustível necessário para operar com o *spray dryer*, foram consideradas as eficiências da instalação industrial, tais como: efetividade dos trocadores de calor e eficiência térmica dos geradores. Os novos valores foram denominados “reais” pois levam em conta tais eficiências.

A Fig. 22 apresenta o desenho técnico individual dos trocadores de calor apresentados na Fig. 17.

Figura 22: Trocador de calor aletado RHF-1495X1840-4 do *spray dryer*.



Fonte: APEMA Equipamentos Industriais (2019).

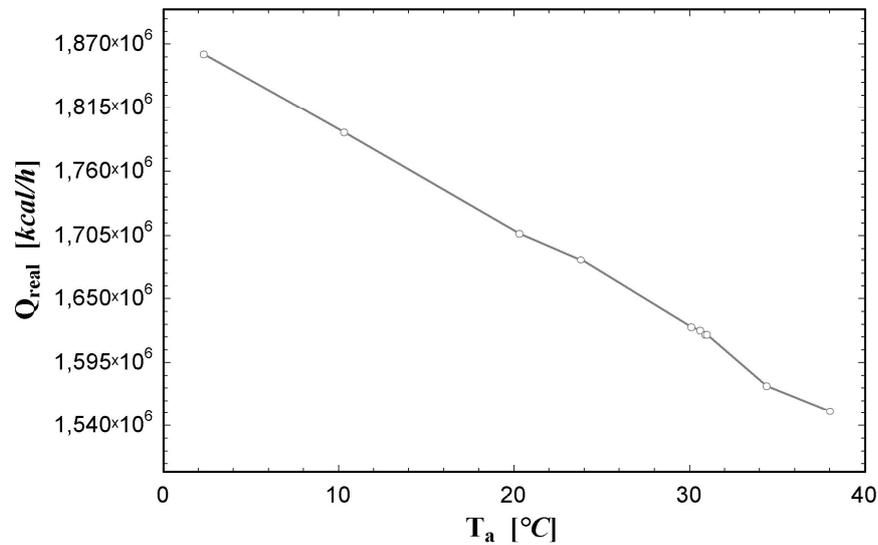
A partir dos desenhos apresentados na Fig. 22 e do diagrama esquemático da Fig. 17 utilizaram-se os dados técnicos fornecidos pelo fabricante para determinação da efetividade dos conjuntos de trocadores responsáveis pelo aquecimento do ar de secagem. Para esse cálculo foi utilizada a rotina do *EES* através método NUT-efetividade para trocadores aletados com fluxo cruzado e ambos fluidos não misturados.

A Tab. 4 apresenta os dados dos trocadores, suas respectivas efetividades, dados da instalação e a eficiência térmica do sistema de aquecimento do ar de secagem do *spray dryer*.

Tabela 4: Projeto térmico do sistema de aquecimento do ar de secagem do *spray dryer*.

Dados técnicos	Unidade	TC VAPOR / AR (Conjunto de 3 unidades)		TC ÓLEO / AR (Conjunto de 4 unidades)	
		LADO INTERNO VAPOR SATURADO	LADO EXTERNO AR	LADO INTERNO ÓLEO TÉRMICO	LADO EXTERNO AR
Número de passes	-	1	1	1	1
Pressão de operação	kgf/cm ² (abs)	10,6	1	8	1
Vazão mássica	kg/h	2242,4	35000	23925	35000
Temperatura de entrada	°C	181,5	25	250	150
Temperatura de saída	°C	181,5	150	220	210
Massa específica	kg/m ³	5,32	0,972	725	0,774
Calor Específico	kcal/kg°C	0,615	0,246	0,633	0,248
Carga térmica	kcal/h	1076000		454294	
ΔT_{ml}	°C	78,13		39,09	
Área de troca total do conjunto	m ²	727,5		970	
Efetividade dos trocadores		0,798		0,520	
Eficiência térmica dos geradores (Caldeira e Aq de Fluido térmico)				0,80	

A partir dos resultados da Tab. 4, onde são apresentadas as especificações dos trocadores da Fig. 22 e as características da instalação industrial que tem disponível o sistema de aquecimento vapor/ar e óleo térmico/ar, os valores de Q apresentados da Fig. 21 foram recalculados, considerando a eficiência térmica dos geradores. A Fig. 23 apresenta os resultados para Q_{real} .

Figura 23: Energia térmica real sem desumidificação - Variação $T_a \times Q_{real}$.

Com base nos resultados apresentadas na Fig. 23, os geradores de energia térmica, que correspondem à caldeira e ao aquecedor do fluido térmico, deverão fornecer de $1,56 \times 10^6$ kcal/h a $1,86 \times 10^6$ kcal/h, aproximadamente, de acordo com as variações de temperatura e umidade do ambiente, apresentadas na Tab. 2. Com base nestas informações, pôde-se calcular o consumo de combustível para o processo a partir das fontes de energia disponíveis. A Tab. 5 mostra o poder calorífico inferior em base úmida para cada diferente combustível disponível e que são utilizados ao longo do ano na operação da fábrica.

Tabela 5: Poder calorífico inferior de diferentes combustíveis utilizados na instalação.

COMBUSTÍVEL	PCI_{comb} (bu) [kcal/kg]
Lenha 30% de umidade	2790
Lenha 40% de umidade	2300
Biomassa 51% de umidade	3965

Fonte: CIENTEC (2016).

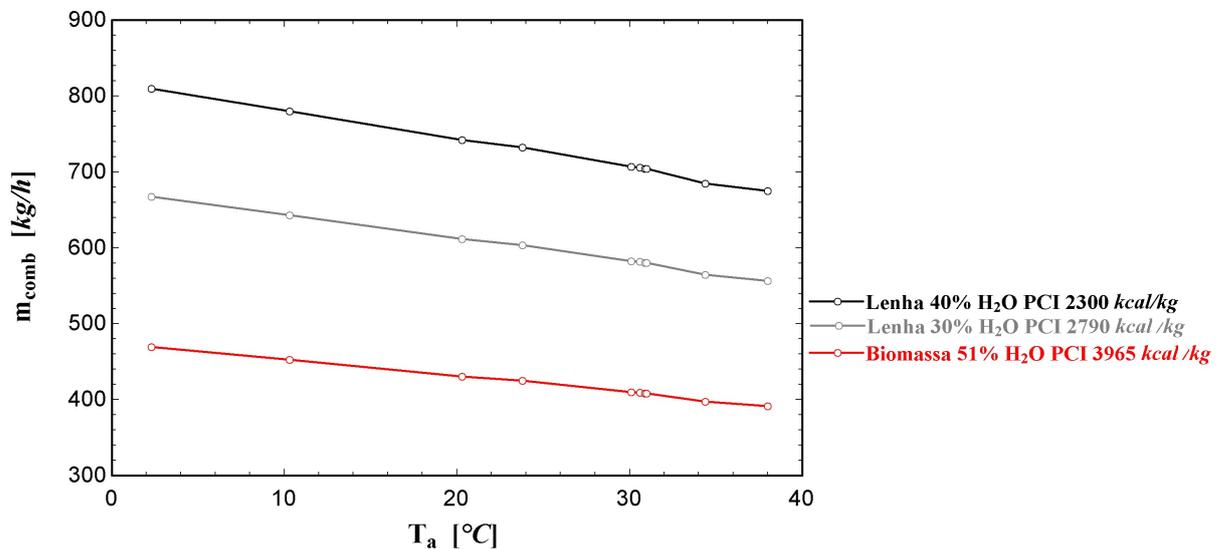
A partir dos valores apresentados na Tab. 5 foi possível determinar o consumo de lenha para operar com o *spray dryer* sem a desumidificação do ar de secagem para cada uma das situações. Para essa análise foram realizadas variações da temperatura, umidade ar e pressão atmosférica, conforme valores apresentados na Tab. 2.

A massa de combustível utilizada pode ser calculada pela Eq. (2.11), em que PCI_{comb} é o poder calorífico inferior do combustível em base úmida.

$$m_{comb} = Q_{real}/PCI_{comb} \quad (2.11)$$

Os resultados do consumo de combustível do *spray dryer* sem que o ar seja desumidificado e para cada um dos combustíveis da Tab. 5 são apresentados na Fig. 24.

Figura 24: Consumo do *spray dryer* sem desumidificação - Variação $T_a \times m_{comb}$.



A partir da Fig. 24 é possível afirmar que, dependendo da temperatura e do poder calorífico do combustível, o consumo poderá variar de 400 kg/h a 820 kg/h, aproximadamente. Essa análise tem o objetivo de mostrar o consumo de combustível necessário para manter em funcionamento o *spray dryer* sem que o ar seja desumidificado (úmido), fornecendo calor suficiente para evaporar a água na câmara de secagem e manter a taxa de saída TXS em 1755 kg/h de pó. Ao final dos resultados, após a seleção do desumidificador e utilizando ar desumidificado, os resultados obtidos serão comparados.

A metodologia de cálculo apresentada até aqui utiliza dados de um processo onde a lenha e a biomassa são as fontes de energia disponíveis, contudo, os equacionamentos podem ser aplicados a qualquer combustível substituindo-se o poder calorífico.

4.4 Seleção do desumidificador com sólido dessecante para o processo

Após o cálculo para determinação da vazão de ar necessária para processo, conforme apresentado na Fig. 20 e sabendo-se das amplitudes climáticas do local onde irá operar o desumidificador, foi calculada a capacidade de remoção de umidade, MRC , a partir da Eq. (2.7). MRC representa a quantidade de água que a roda dessecante deve remover. Para isso, foi fixada uma umidade absoluta ideal, y_{ds} , de $0,004 \text{ kgH}_2\text{O/kg}$ ar seco após a roda dessecante. Essa umidade, conforme apresentado na Tab. 2, garante uma condição de inverno (clima seco) para secagem durante o ano todo e torna a operação do *spray dryer* livre das flutuações de umidade y_{de} , que ocorrem durante as estações do ano e variações ao longo do dia.

Os resultados da aplicação das variações da Tab. 2 à Eq. (2.7) são apresentados na Tab. 6.

Tabela 6: Cálculo da capacidade de remoção de umidade ideal, MRC .

T_a [°C]	UR_{T_a} [-]	dp_{T_a} [°C]	P_{atm} [Pa]	ρ_d [kg/m³]	A_d [m³/h]	y_{de} [kg/kg]	y_{ds} [kg/kg]	MRC [kg/h]
2,3	0,92	1,1	102420	1,292	40738	0,004045	0,004	2,383
10,3	1	10,3	101960	1,247	41012	0,007738	0,004	191,2
20,3	0,806	16,5	101080	1,191	41469	0,01177	0,004	383,9
23,8	1	23,7	100730	1,169	41780	0,01865	0,004	715,1
30,1	0,7	23,9	100550	1,142	41862	0,01891	0,004	713
30,6	0,73	25,1	100970	1,144	41720	0,02028	0,004	777,1
30,9	0,7	24,6	100710	1,14	41814	0,01972	0,004	749,4
31	0,71	25	100380	1,136	41966	0,02028	0,004	776
34,4	0,33	15,8	100710	1,133	41609	0,01129	0,004	343,7
38	0,46	24,5	99990	1,107	42116	0,01974	0,004	733,6

Na Tab. 6 são apresentadas as variáveis: A_d que representa a vazão de ar na saída do desumidificador, que é igual à vazão volumétrica de ar \dot{V} , apresentada Fig. 20, a massa específica do ar ρ_d calculada para as diferentes temperaturas do ambiente T_a e dp_{T_a} que é a temperatura de orvalho.

A partir dos resultados apresentados da MRC da Tab. 6 foi realizada uma pesquisa no mercado brasileiro e estrangeiro para encontrar um desumidificador com tecnologia que utiliza uma roda com sólido dessecante que fosse capaz fornecer uma solução técnica adequada ao processo.

Diante das opções disponíveis, foi feito contato com o fabricante americano Munters que possui fábrica no Brasil. Dentro da linha de produtos comercializados, a linha ICA foi

recomendada, pois é a mais adequada à aplicação sendo especialmente desenvolvida para fábricas de alimentos e farmacêuticas. Uma ilustração do desumidificador da linha ICA da Munters é apresentado na Fig. 25.

Figura 25: Desumidificador linha ICA Munters.



Fonte: Munters Corporation (2019).

A partir dos resultados de MRC da Tab.6 foi realizado contato com o fabricante para avaliação de performance dos desumidificadores da linha ICA em cada uma das condições de operação. Dentre os modelos disponíveis, o desumidificador modelo ICA-3000 foi o mais adequado devido aos valores de A_d . Esse desumidificador possui uma roda dessecante denominada *Quantum*, com diâmetro externo de 3000 mm, 400 mm de espessura e composta por sílica gel dessecante e peneira molecular, capaz de remover no máximo 15 gH₂O/kg ar seco, ou seja, o Δ_y entre a entrada e a saída do desumidificador é de no máximo 0,015 kg H₂O/kg ar seco.

Pelo motivo da roda dessecante *Quantum* ser aquela com maior poder de adsorção disponível no mercado devido a sua composição especial e métodos de fabricação, foi necessário colocar a variável Δ_y limitada a 0,015 kg H₂O/kg ar nos cálculos e recalculer y_{ds} para avaliar as condições nas quais não seria possível obter a condição ideal de 0,004 kg H₂O/kg ar seco na saída do desumidificador. Esses resultados foram denominados MRC_{real} , que é o máximo de umidade que a roda dessecante pode adsorver e também $y_{ds_{real}}$ que representa a umidade absoluta real na saída do desumidificador. A Tab. 7 mostra os resultados para cada uma das condições de entrada.

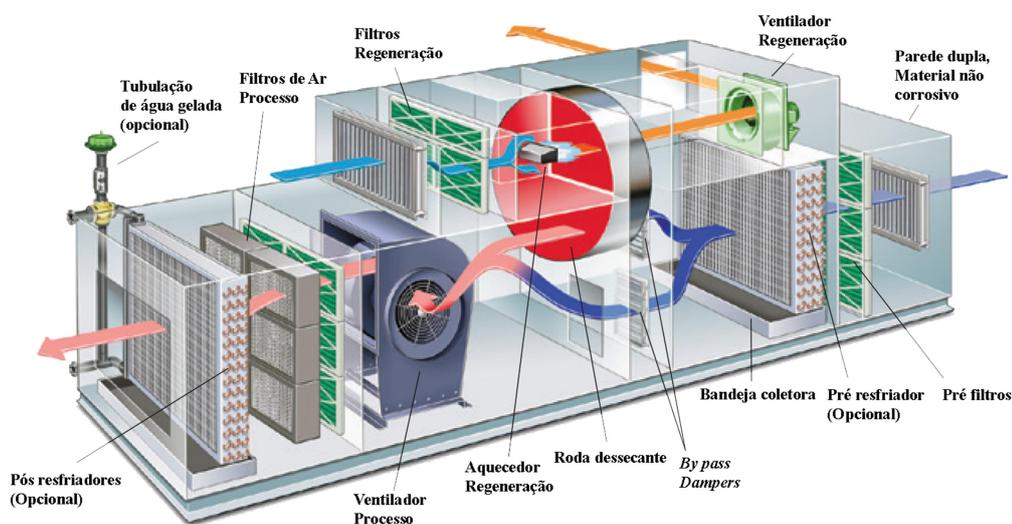
Tabela 7: Cálculo da capacidade de remoção de umidade real, MRC_{real} .

T_a [°C]	UR_{T_a} [-]	dp_{T_a} [°C]	P_{atm} [Pa]	ρ_d [kg/m ³]	A_d [m ³ /h]	y_{de} [kg/kg]	$y_{ds;real}$ [kg/kg]	MRC_{real} [kg/h]
2,3	0,92	1,1	102420	1,292	40738	0,004045	0,004	2,383
10,3	1	10,3	101960	1,247	41012	0,007738	0,004	191,2
20,3	0,806	16,5	101080	1,191	41469	0,01177	0,004	383,9
23,8	1	23,7	100730	1,169	41780	0,01865	0,004	715,1
30,1	0,7	23,9	100550	1,142	41862	0,01891	0,004	713
30,6	0,73	25,1	100970	1,144	41720	0,02028	0,0053	716
30,9	0,7	24,6	100710	1,14	41814	0,01972	0,0047	715,3
31	0,71	25	100380	1,136	41966	0,02028	0,0053	715,1
34,4	0,33	15,8	100710	1,133	41609	0,01129	0,004	343,7
38	0,46	24,5	99990	1,107	42116	0,01974	0,0047	699,1

Os resultados apresentados na Tab. 7 foram obtidos a partir da Eq. (2.7) e mostram que: em quatro dias de umidade elevada, o desumidificador não atingiria a umidade ideal y_{ds} de 0,004 kgH₂O/kg ar seco, pois nestes dias o valor de Δy entre a entrada e saída ideal do desumidificador foi superior a 0,015 kg H₂O/kg ar seco. Nos demais dias, a umidade ideal y_{ds} foi atingida e inclusive na média do período analisado, com temperatura de 20,3 °C e umidade absoluta na entrada y_{de} de 0,01177 kg H₂O/kg ar seco, conforme Tab. 2, o valor ideal também foi atingido.

Para contornar situações onde uma umidade superior àquela definida como umidade ideal não pode ser alcançada apenas com a utilização da roda com sólido dessecante, a Munters dispõe de acessórios opcionais que podem ser incorporados ao desumidificador de forma a reduzir a umidade na saída a valores próximos à zero. Esses sistemas utilizam, geralmente, água gelada e operam com temperaturas abaixo do ponto de orvalho do ar, o que gera a condição para condensação do vapor d'água presente no ar, desumidificando o mesmo. A Fig. 26 mostra o escoamento de ar no interior de um desumidificador ICA e todos os equipamentos e acessórios disponíveis para essa linha.

Figura 26: Detalhe do escoamento de ar no desumidificador ICA-3000.



Fonte: Munters Corporation (2019).

Para esse estudo, desumidificadores que utilizam trocadores com água gelada para condensação do vapor d'água não foram considerados, pois explora-se o aumento da temperatura após a roda dessecante. O resfriamento do ar de secagem reduziria a eficiência do *spray dryer* além de aumentar o consumo de energia elétrica do sistema. A instalação industrial analisada não possui rede de água gelada disponível e os dias em que y_{ds} apresentou valores acima do ideal, conforme mostrado na Tab. 7 foram avaliados durante o decorrer do desenvolvimento dos cálculos e seus impactos analisados.

Através do detalhe do escoamento de ar mostrado no desumidificador da Fig. 26 foi possível notar a utilização de *dampers*. Esses componentes são controlados pela automação do desumidificador de maneira a permitir ou restringir a passagem de ar pela roda ou pela lateral. São esses *dampers* que fazem com que o desumidificador possa operar de forma contínua e de acordo com o *set point* de umidade configurado pelo operador no seu controlador.

4.5 Energia térmica necessária para aquecer o ar de secagem com desumidificação por adsorção

A partir da seleção do desumidificador é possível simular a sua influência no *spray dryer*. As principais variáveis são: umidade absoluta e temperatura na saída do desumidificador. A umidade absoluta na saída do desumidificador, $y_{ds, real}$, foi calculada e os

resultados apresentados na Tab. 7. A partir de dados técnicos do fabricante é possível determinar a temperatura após a roda dessecante.

Segundo a Munters, no processo de adsorção da roda dessecante *Quantum*, ocorre um aumento de temperatura do ar que varia de 3,5 a 3,6 °C para cada g de H₂O removida de 1 kg de ar. A partir dessa especificação, que foi garantida pelo *data sheet* do componente e confirmada pelo departamento de engenharia da Munters, foi possível encontrar a temperatura do ar na saída do desumidificador com sólido dessecante, denominada a $T_{s;dd}$. Os resultados de $T_{s;dd}$ e o Δy entre a entrada (y_{de}) e saída do equipamento ($y_{ds;real}$) são apresentados na Tab. 8.

Tabela 8: Temperatura de saída do desumidificador, $T_{s;dd}$.

T_a [°C]	UR_{T_a} [-]	dp_{T_a} [°C]	P_{atm} [Pa]	y_{de} [kg/kg]	$y_{ds;real}$ [kg/kg]	Δy [g]	$T_{s;dd}$ [°C]
2,3	0,92	1,1	102420	0,004045	0,004	0,04527	2,46
10,3	1	10,3	101960	0,007738	0,004	3,738	23,38
20,3	0,806	16,5	101080	0,01177	0,004	7,771	47,50
23,8	1	23,7	100730	0,01865	0,004	14,65	75,06
30,1	0,7	23,9	100550	0,01891	0,004	14,91	82,29
30,6	0,73	25,1	100970	0,02028	0,0053	15	83,10
30,9	0,7	24,6	100710	0,01972	0,0047	15	83,40
31	0,71	25	100380	0,02028	0,0053	15	83,50
34,4	0,33	15,8	100710	0,01129	0,004	7,289	59,91
38	0,46	24,5	99990	0,01974	0,0047	15	90,50

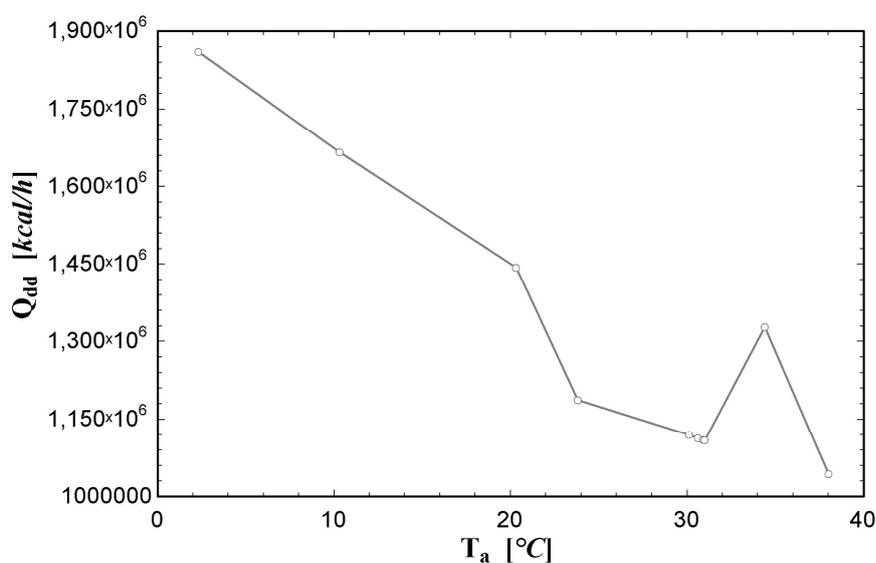
Os resultados apresentados na Tab.8 mostram que em dias úmidos e quentes, a temperatura na saída do desumidificador poderá atingir 90,5 °C. A partir destes resultados foi possível recalculer a quantidade de calor necessária para aquecer o ar de secagem do *spray dryer* considerando que o ar de secagem é desumidificado e admitindo-se a eficiência térmica do sistema calculada na Tab. 4. Este resultado foi denominado Q_{dd} .

Para os cálculos de Q_{dd} foram utilizadas as temperaturas de saída do desumidificador $T_{s;dd}$ da Tab. 8 e a Eq. (2.6). Substituíram-se as variáveis T_a , por $T_{s;dd}$, e y_a por $y_{ds;real}$. Os correspondentes calores específicos do ar e vapor d'água, $ca_{a;dd}$ e $cv_{a;dd}$, também foram substituídos. Os resultados são apresentados na Tab. 9.

Tabela 9: Energia térmica para aquecer o ar de secagem desumidificado, Q_{dd} .

T_a [°C]	UR_{ra} [-]	dp_{ra} [°C]	P_{atm} [Pa]	$y_{ds,real}$ [kg/kg]	$T_{s,dd}$ [°C]	$ca_{a,dd}$ [kcal/kg°C]	$ca_{a,dd}$ [kJ/kg°C]	$cv_{a,dd}$ [kcal/kg°C]	$cv_{a,dd}$ [kJ/kg°C]	Q_{dd} [kcal/h]	Q_{dd} [kW]
2,3	0,92	1,1	102420	0,004	2,458	0,2403	1,006	0,4441	1,859	1,86E+06	2163
10,3	1	10,3	101960	0,004	23,38	0,2404	1,007	0,4452	1,864	1,67E+06	1938
20,3	0,806	16,5	101080	0,004	47,5	0,2406	1,007	0,4468	1,871	1,44E+06	1679
23,8	1	23,7	100730	0,004	75,06	0,2411	1,009	0,449	1,88	1,19E+06	1381
30,1	0,7	23,9	100550	0,004	82,29	0,2412	1,01	0,4497	1,883	1,12E+06	1302
30,6	0,73	25,1	100970	0,0053	83,1	0,2412	1,01	0,4497	1,883	1,11E+06	1295
30,9	0,7	24,6	100710	0,0047	83,4	0,2412	1,01	0,4498	1,883	1,11E+06	1291
31	0,71	25	100380	0,0053	83,5	0,2412	1,01	0,4498	1,883	1,11E+06	1291
34,4	0,33	15,8	100710	0,004	59,91	0,2408	1,008	0,4477	1,874	1,33E+06	1545
38	0,46	24,5	99990	0,0047	90,5	0,2414	1,011	0,4504	1,886	1,04E+06	1214

Com os resultados de Q_{dd} obtidos na Tab. 9, gerou-se então o gráfico que relaciona a temperatura ambiente T_a com Q_{dd} . Essa variação é apresentada na Fig. 27.

Figura 27: Energia térmica real do *spray dryer* com desumidificação - Variação $T_a \times Q_{dd}$.

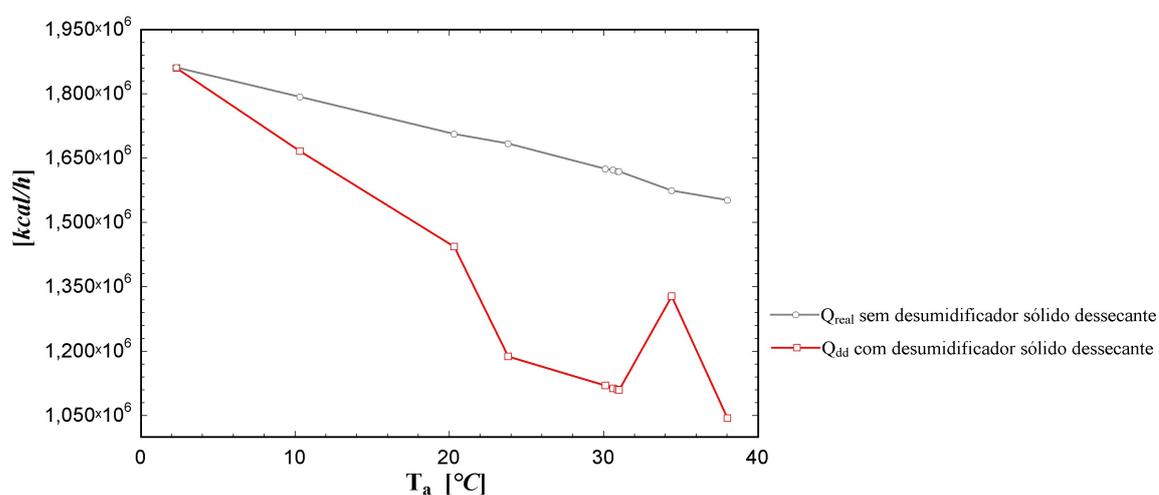
Na análise dos resultados apresentados na Fig. 27 notou-se que, de acordo com a umidade ambiente e a temperatura de saída do desumidificador, a demanda por energia térmica sofre variações. Dentre essas variações, chamou a atenção o pico de energia térmica necessária para aquecer o ar de secagem na temperatura de 34,4 °C. Isso ocorreu devido à queda da temperatura de saída do desumidificador, $T_{s,dd}$, reflexo da baixa umidade na respectiva data analisada, conforme a Tab. 2. As próximas seções apresentam os resultados finais que comparam a performance do processo com e sem a utilização do ar desumidificado

e também analisa a energia térmica consumida pelo desumidificador para a regeneração do ciclo de adsorção.

4.6 Comparação e resultados de processo

A partir dos dados coletados da estação do INMET e do cálculo da umidade absoluta do ar em cada uma das datas, conforme apresentado na Tab.2, foram realizados os cálculos e apresentado o gráfico para determinar a energia térmica real necessária para operar com o *spray dryer* sem o desumidificador na Fig. 23, em que condições climáticas de inverno e verão foram aplicadas e os resultados analisados. Os mesmos dados do INMET utilizados na Fig. 23 foram utilizados como variáveis de entrada para o cálculo da energia térmica necessária para operar o *spray dryer* com ar desumidificado, com os resultados apresentados na Fig. 27. A Fig. 28 apresenta um comparativo desses resultados.

Figura 28: Energia térmica para aquecer o ar de secagem do *spray dryer* com e sem desumidificação - Comparação $T_a \times Q_{dd} \times Q_{real}$.

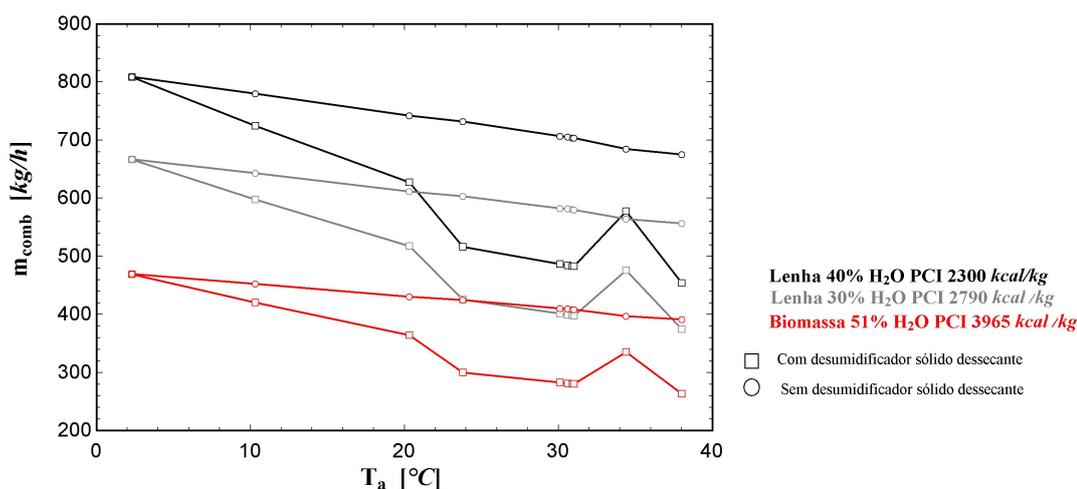


Apesar das maiores variações ocorridas quando simulada a operação do desumidificador sólido dessecante fornecendo ar desumidificado para o *spray dryer*, houve significativa redução do consumo de energia térmica do processo devido à temperatura mais alta na saída do desumidificador, conforme apresentado na Tab. 8 e na Fig. 28. Importante observar que quanto maiores as temperaturas e as umidades absolutas registradas maiores foram as reduções.

Notou-se também na análise da Fig. 28 uma demanda por energia térmica aproximadamente igual na comparação entre o ar desumidificado e não desumidificado no dia mais frio do período analisado, registrado em 07/07/19 na temperatura de 2,3 °C, conforme Tab. 2. Isso ocorreu pois neste dia a umidade absoluta ambiente foi a menor e muito próxima da ideal, resultando no menor valor da *MRC* apresentado na Tab. 7 e gerando pouco efeito do desumidificador sob o aquecimento do ar de secagem para essa condição.

O cálculo do consumo de combustível para o processo de *spray drying* foi realizado a partir dos resultados apresentados na Fig. 28 e comparado aos resultados da Fig. 24. Com base na Tab.5 foram determinados os diferentes consumos. Os resultados são apresentados na Fig. 29.

Figura 29: Comparação do consumo de combustível do *spray dryer* com e sem desumidificação.



Na Fig. 29, observou-se pouca diferença no consumo de combustível em dias frios quando o ar de secagem é desumidificado ou não. Assim como na Fig. 28, esse resultado se deve ao pequeno efeito da desumidificação quando o clima se encontra em uma condição de baixa umidade. Da mesma maneira, ocorreram picos de consumo com a utilização do desumidificador na temperatura de 34,4 °C, pois, apesar de um dia quente, foi registrado um clima mais seco com umidade absoluta menor.

O consumo do mesmo combustível para o processo *spray drying* com ar de secagem desumidificado, será sempre menor quando o ar apresenta altos níveis de umidade na entrada do desumidificador. Os resultados apresentados na Fig. 29 não consideram perdas por

radiação que podem variar de instalação para instalação, de acordo com a temperatura na qual a tubulação de condução do fluido está exposta, a eficiência do seu isolamento térmico, comprimento, etc.

Na próxima seção são analisados os consumos de energia térmica e elétrica do desumidificador modelo ICA-3000, apresentado na Fig. 26 para operação e regeneração do ciclo e será demonstrada a viabilidade técnica e econômica.

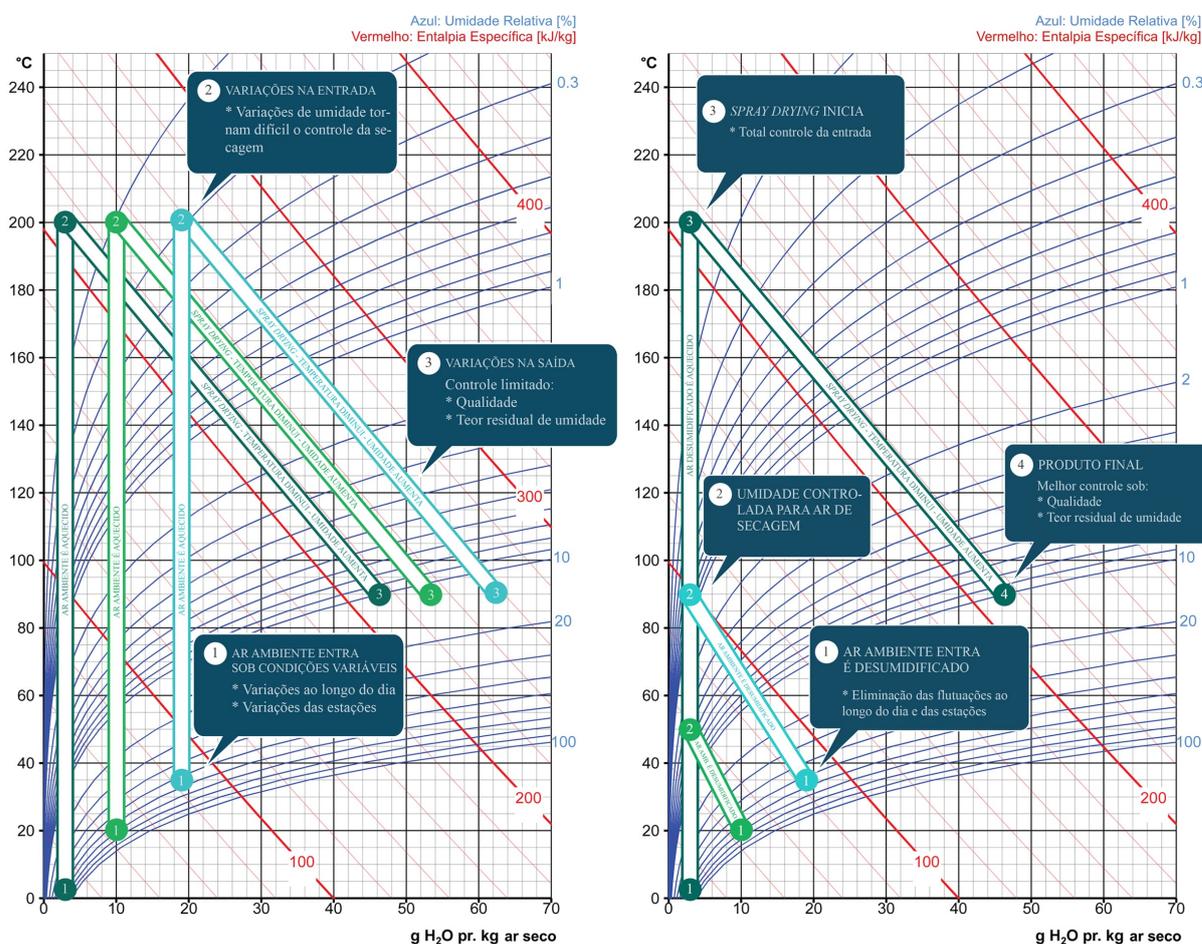
4.7 Resultados finais e análise de viabilidade

A partir dos resultados apresentados nas seções anteriores, buscou-se demonstrar através de comparativos e tabelas a aplicabilidade técnica e o potencial de retorno do investimento da instalação do desumidificador com sólido dessecante no processo de secagem por *spray drying*. Nesta etapa, além da análise do processo foi realizada a análise energética do desumidificador.

4.7.1 Umidade

Primeiramente, avaliaram-se os ganhos relacionados à umidade. A Fig. 30 mostra uma comparação com a Fig. 15, apresentada na metodologia deste trabalho. Esse comparativo demonstra no diagrama de Mollier como ocorre a secagem por *spray drying* com o ar de secagem desumidificado e não desumidificado.

Figura 30: Demonstração da desumidificação na secagem por *spray drying* em um diagrama de Mollier para altas temperaturas.



A comparação realizada entre os diagramas apresentados na Fig. 30 mostra que a desumidificação (à direita) oferece uma umidade absoluta contínua para o ar de secagem. Devido a isso, o controle da entrada é total durante a operação do *spray dryer*, mantendo a umidade absoluta e relativa do ar na saída constante, possibilitando aumento de qualidade e controle total do conteúdo de umidade residual do produto final.

Os resultados apresentados na Tab. 7 mostram que a máxima variação com a utilização do desumidificador ICA-3000 seria de aproximadamente 1 gH₂O/kg de ar em dias extremamente úmidos, contudo, dias de umidade igual ou menor que 19 gH₂O/kg e na média do período analisado, o desumidificador atenderia plenamente a condição de 4 gH₂O/kg de ar, determinada como ideal para eliminar totalmente as flutuações da umidade ao longo do ano.

Conforme mostrado nos resultados da Tab. 8, é possível observar também nos diagramas da Fig. 30 o aumento da temperatura do ar ao passar pela roda dessecante. O

fornecimento de ar com temperatura maior ao sistema de aquecimento do processo aumenta sua eficiência conforme a Eq. (2.1), entretanto o poder de adsorção da roda dessecante deve ser regenerado e existe consumo de energia para realização deste ciclo.

A regeneração da roda promove a dessorção do material dessecante e torna a desumidificação cíclica. A próxima seção apresenta os cálculos pertinentes à regeneração e o consumo de energia térmica para realização desta etapa do ciclo.

4.7.2 Regeneração

O ciclo termodinâmico que ocorre em uma roda dessecante é baseado na diferença da pressão de vapor da superfície do material dessecante e na pressão de vapor do ar. Na adsorção, a roda dessecante aumenta o seu conteúdo de umidade, liberando calor latente e elevando a temperatura do ar. O processo de regeneração acontece através da passagem de ar quente pela roda. Nesta etapa, a água retida nos poros é evaporada e o material dessecante é reativado.

Assumindo que a roda dessecante é um volume de controle e aplicando a ela um balanço de energia é possível determinar a quantidade de calor necessária para regeneração do ciclo.

A Fig. 31 mostra a representação do volume de controle para o ciclo de desumidificação com sólido dessecante.

Figura 31: Volume de controle da roda dessecante.



Aplicando o balanço de energia da Eq. (2.10) ao volume de controle apresentado na Fig. 31, foram obtidos os resultados apresentados na Tab. 10.

Tabela 10: Energia térmica sensível, latente e de regeneração para a desumidificação.

T_a [°C]	UR [-]	τ_a [°C]	dp_{τ_a} [Pa]	P_{atm} [Pa]	\dot{m}_d [kg/s]	$T_{s_{dd}}$ [°C]	Q_{sens} [kcal/h]	Q_{lat} [kcal/h]	Q_{reg} [kcal/h]	Q_{reg} [kW]
2,3	0,92	1,1	102420	14,62	2,458	2015	-1426	588,6	0,6845	
10,3	1	10,3	101960	14,21	23,38	162285	-115099	47186	54,88	
20,3	0,806	16,5	101080	13,72	47,5	327289	-232785	94504	109,9	
23,8	1	23,7	100730	13,56	75,06	614046	-434717	179330	208,6	
30,1	0,7	23,9	100550	13,28	82,29	612688	-435452	177236	206,1	
30,6	0,73	25,1	100970	13,26	83,1	616773	-437440	179333	208,6	
30,9	0,7	24,6	100710	13,25	83,4	615512	-437079	178432	207,5	
31	0,71	25	100380	13,24	83,5	615970	-436987	178982	208,2	
34,4	0,33	15,8	100710	13,1	59,91	293078	-210541	82537	95,99	
38	0,46	24,5	99990	12,95	90,5	601947	-429419	172528	200,7	

A partir da Fig. 31 e dos resultados apresentados na Tab. 10 foi possível compreender o aumento da energia sensível relacionada à diferença de temperatura entre o ar ambiente T_a e a temperatura de saída do ar de processo do desumidificador $T_{s_{dd}}$. A vazão mássica de ar que passa através da roda dessecante do desumidificador, \dot{m}_d sofre variações devido às temperaturas do ambiente T_a . Os valores da energia latente (Q_{lat}) aumentaram devido à diferença de entalpia gerando liberação de calor latente na transferência da umidade do ar para o material sólido dessecante.

A energia total é a soma da energia latente e sensível e o resultado é a energia necessária para regeneração do ciclo, Q_{reg} , ou seja, a quantidade de energia que deverá ser transferida do ar de regeneração para a roda dessecante sob forma de calor para a dessorção e início do ciclo novamente.

A transferência da energia térmica Q_{reg} para o ar de regeneração acontece através de um aquecedor, que pode operar com vapor, óleo térmico ou qualquer outro fluido para realização da troca térmica, conforme apresentado na Fig. 26. Essa demanda por energia pode representar o maior custo de operação do desumidificador e, por esse motivo, sua avaliação é de grande importância. Como não foi obtida nenhuma informação técnica do fabricante com relação à eficiência térmica do regenerador, assumiu-se esta igual a 80%, a partir de estudos científicos realizados na área de desumidificação por adsorção.

Sabendo-se a eficiência térmica do regenerador e dos geradores, apresentado na Tab. 4, foi possível então calcular os valores da energia térmica necessária de fornecimento para

regeneração do ciclo $Q_{reg, real}$. Esse resultado foi somado à energia utilizada para aquecer o ar desumidificado, Q_{dd} , apresentada na Fig. 27 e o resultado é a energia final, Q_{FINAL} necessária para operar com o *spray dryer* utilizando o desumidificador sólido dessecante. Os resultados são apresentados na Tab. 11.

Tabela 11: Energia térmica Q_{FINAL} para operação do *spray dryer* com desumidificador.

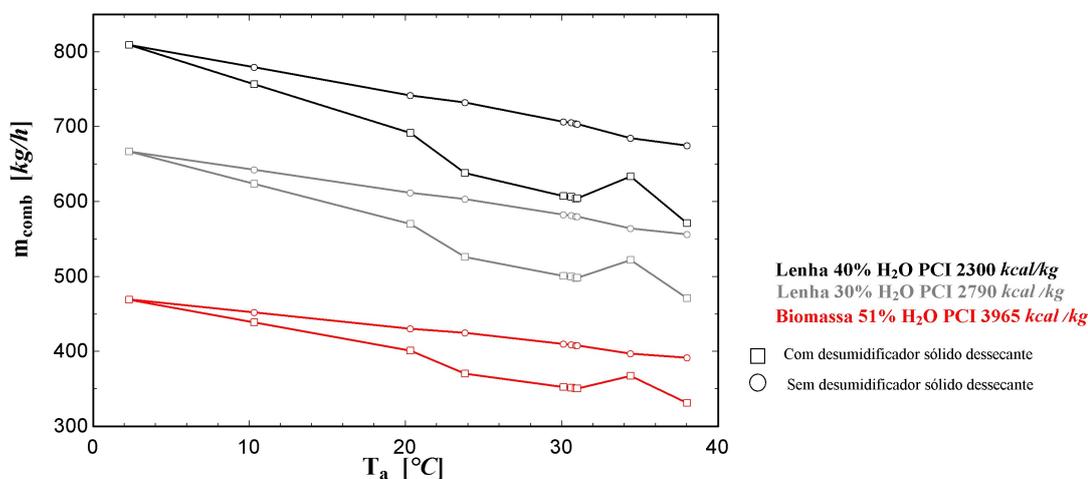
$Q_{regreal}$ [kcal/h]	Q_{dd} [kcal/h]	Q_{FINAL} [kcal/h]	Q_{FINAL} [kW]
921,9	1,86E+06	1,86E+06	2164
73913	1,67E+06	1,74E+06	2024
148033	1,44E+06	1,59E+06	1851
280905	1,19E+06	1,47E+06	1707
277625	1,12E+06	1,40E+06	1625
280909	1,11E+06	1,39E+06	1622
279499	1,11E+06	1,39E+06	1616
280361	1,11E+06	1,39E+06	1617
129288	1,33E+06	1,46E+06	1695
270250	1,04E+06	1,31E+06	1528

Com base nos resultados apresentados na Tab. 11 e sabendo-se da energia térmica para operar com o processo sem a desumidificação do ar, Q_{real} conforme apresentado na Fig. 23, foi possível comparar as energias e calcular o consumo de combustível para cada uma das situações para verificar a sua redução. Os resultados finais são apresentados na Tab. 12 e na Fig. 32.

Tabela 12: Resultado final – Redução de energia térmica.

T_a [°C]	UR_{T_a} [-]	dp_{T_a} [°C]	P_{atm} [Pa]	Q_{FINAL} [kcal/h] (com desumidificador)	Q_{real} [kcal/h] (sem desumidificador)	Q_{FINAL} [kW] (com desumidificador)	Q_{real} [kW] (sem desumidificador)	Redução [%]
2,3	0,92	1,1	102420	1,86E+06	1,86E+06	2164	2165	0,05%
10,3	1	10,3	101960	1,74E+06	1,79E+06	2024	2086	2,97%
20,3	0,806	16,5	101080	1,59E+06	1,71E+06	1851	1985	6,75%
23,8	1	23,7	100730	1,47E+06	1,68E+06	1707	1959	12,86%
30,1	0,7	23,9	100550	1,40E+06	1,63E+06	1625	1890	14,02%
30,6	0,73	25,1	100970	1,39E+06	1,62E+06	1622	1887	14,04%
30,9	0,7	24,6	100710	1,39E+06	1,62E+06	1616	1883	14,18%
31	0,71	25	100380	1,39E+06	1,62E+06	1617	1883	14,13%
34,4	0,33	15,8	100710	1,46E+06	1,58E+06	1695	1832	7,48%
38	0,46	24,5	99990	1,31E+06	1,55E+06	1528	1806	15,39%

Figura 32: Resultado final – Consumo de combustível com e sem desumidificação.



No resultado final do consumo de combustível apresentado na Fig. 32 verificou-se redução para os três combustíveis analisados e disponíveis na instalação. Em comparação com a Fig. 29 ocorreu uma aproximação das linhas devido à soma da energia térmica utilizada pelo desumidificador para regeneração do ciclo. Na Fig. 29 foi analisada somente a demanda de energia térmica do processo e na Fig. 32 avaliou-se também a quantidade de energia empregada para a regeneração do ciclo, em que ambos os resultados foram somados e comparados ao cenário no qual o ar não é desumidificado, apresentado na Fig. 23.

Apesar do aumento da energia para regeneração, verificaram-se através dos resultados da Tab. 12 reduções de até 15,4% em dias com elevada umidade absoluta e temperatura ambiente. Conforme dados apresentados na Tab. 2 e em destaque na Tab. 12, para a condição climática média do período, a redução da demanda por energia térmica foi de 6,8% quando utilizado o desumidificador com sólido dessecante ICA-3000 com rotor *Quantum*.

A seção a seguir faz a avaliação econômica do desumidificador a partir dos resultados apresentados.

4.7.3 Análise Econômica

Com base nos resultados apresentados na seção anterior, pode-se observar que houve reduções de até 15,4% em combustível com a desumidificação, contudo, os cálculos mostraram que na condição climática média registrada do período analisado, a economia seria de 6,8% e em temperaturas baixas com clima seco, a economia se reduz até chegar ao mínimo de 0,05%.

Com relação à energia elétrica, o desumidificador ICA-3000 possui uma potência elétrica total de 71 kW, o que representa um aumento de 26,7% em relação ao sistema convencional de injeção de ar através de ventilador centrífugo de 55 kW, apresentado na Fig. 17.

A instalação do desumidificador garante o controle total da secagem o que representa redução de perdas por umidade conforme apresentadas na Fig. 14, com valor médio anual de R\$ 512.791,00 por *spray dryer*, para a instalação estudada.

A redução do custo de máquina parada para lavagem da câmara de secagem e sistemas de transporte devido à obstrução ou acúmulo de produto é um dos principais benefícios ao manter a umidade do ar constante, conforme apresentado no comparativo da Fig. 30.

Com custo aproximado de R\$ 1.600.000,00 para o ano de 2019 e vida útil média de 15 anos, o desumidificador por adsorção com sólido dessecante para esse estudo, apresentou potencial de retorno econômico imediato a partir da sua instalação, podendo assim, potencializar margens de lucro que variam de acordo com o valor agregado de cada produto que é secado no *spray dryer*, as tarifas de energia elétrica a qual a empresa é submetida e o custo de geração da energia térmica.

5 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados mostraram o quão importante foi a análise prévia dos dados meteorológicos do local de instalação do desumidificador para seu dimensionamento. Todos os resultados apresentados foram baseados a partir da coleta de dados do INMET apresentados na Tab. 2, em que foram selecionadas as maiores variações e os dias mais úmidos da estação de meteorologia automática da cidade de Porto Alegre.

A compreensão do processo de secagem a partir da bibliografia e de visitas a processos reais permitiu o conhecimento de cada uma das variáveis envolvidas no processo de secagem por *spray drying* e uma melhor compreensão sobre o funcionamento de cada um dos componentes. Somente a partir do entendimento e da coleta de dados reais foi possível determinar a vazão mássica de ar para realizar a secagem. Essa variável está diretamente ligada a dados de processo e características da câmara de secagem.

Foram utilizadas algumas unidades do sistema imperial ao longo do trabalho, pois não foram encontradas fontes de pesquisa em bibliografia nacional ou países que utilizam o sistema internacional na área de secagem por *spray*. Sem a utilização de algumas destas bibliografias não seria possível chegar aos resultados deste estudo.

A utilização do EES como ferramenta de trabalho para a elaboração dos cálculos e resultados possibilitou análises complexas e com diversas variáveis durante o estudo. A simulação da secagem e desumidificação através do *software* mostrou-se eficaz e precisa com a utilização do banco de dados de propriedades de fluidos.

Embora o desumidificador ICA-3000 não tenha atendido plenamente as variações do clima analisadas durante inverno e verão no ano de 2019, a máxima variação que seria obtida seria de 1 g H₂O em dias extremamente úmidos, conforme apresentados na Tab. 7.

Umidade absoluta totalmente constante em qualquer condição de entrada pode ser obtida a partir da combinação de um sistema que utiliza água gelada, contudo, essa forma construtiva ofereceria ar mais frio ao processo, aumentando o consumo de energia térmica, de combustível e também de energia elétrica.

Qualquer sistema de aquecimento do ar de secagem pode ser combinado com a desumidificação para obter ganhos em redução de energia térmica, porém sistemas com trocadores com elevada efetividade reduzem o economia ao desumidificar o ar por adsorção.

O aproveitamento do calor rejeitado na saída da câmara de secagem como fonte para regeneração do ciclo não foi avaliado pois sabe-se que o ar contém particulado em suspensão,

o que exigiria um sistema complexo de filtragem e tornaria a análise distante da realidade de um processo comum.

Pode-se utilizar o ganho na economia do calor como forma de aumento de produtividade, elevando a temperatura de entrada e aumentando a taxa de alimentação, *TXA*. Isso elevaria a produção de pó *TXS*, porém, a exposição do produto a temperatura mais elevada pode interferir em propriedades como aspecto, sabor, etc.

Ressalta-se que mesmo obtendo ganhos na redução do consumo de energia térmica, ambos os cenários (com e sem desumidificação) foram simulados dentro das mesmas condições ambientais e de eficiência térmica do sistema, conforme apresentado na Tab. 4 e na Tab. 11.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre o desempenho de um desumidificador com sólido dessecante para ser utilizado em um processo de secagem por *spray drying*, para controle da umidade absoluta no ar de entrada do secador.

Utilizando-se dados de um processo real de secagem de extrato de tanino de acácia negra, foi analisado o efeito da umidade do ar ambiente no desempenho do *spray dryer* e diversos aspectos relacionados às dificuldades de controle na operação e qualidade foram observados.

A partir da análise de dados climáticos disponibilizados pelo INMET, verificou-se que o clima na região metropolitana de Porto Alegre apresenta grandes variações em umidade, sendo este aspecto prejudicial ao controle do *spray dryer*. A partir desta condição, foram calculadas as amplitudes da umidade absoluta e então especificado um desumidificador do tipo sólido dessecante para gerenciar as condições do ar de secagem, com o objetivo de eliminar as flutuações que ocorrem ao longo do dia e do ano.

As especificações da roda dessecante apresentadas mostraram que variações de até 15g $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ de ar podem ser eliminadas sem a necessidade de desumidificação por resfriamento, desta maneira, eliminando assim, por exemplo, a necessidade de um sistema que opere com água gelada.

Outro ponto apresentado foi referente ao valor agregado do produto que, quanto maior, melhor deverá ser o controle da umidade residual, pois os prejuízos podem ser enormes. A redução da umidade do ar a níveis menores e constantes permite maior controle do processo, desta maneira aumentando a margem de lucro ao longo das campanhas de produção e no balanço financeiro de final de ano.

A redução do consumo de energia térmica do processo obtida de até 15,4%, para dias com elevada umidade, permitiu a redução do consumo de combustível. Assim, foi demonstrado que a utilização de desumidificadores em *spray dryers* também contribui para redução de emissões provenientes da queima de combustíveis utilizados na geração de vapor d'água, aquecimento do óleo térmico, combustão de gás natural ou qualquer outra utilidade que desempenhe função de aquecer o ar de secagem.

Pode-se atribuir os bons resultados obtidos à alta tecnologia na engenharia de manufatura das rodas dessecantes que possuem grande área de superfície, uma estrutura de fibras organizada e fabricação a partir de materiais de alta capacidade de adsorção,

proporcionando assim, a liberação de calor latente que aquece o ar de forma muito efetiva, o que aumenta a eficiência do processo.

Além dos aspectos até aqui citados, ainda pode-se mencionar que: a utilização de fontes de energia baratas ou que são desperdiçadas no processo com o objetivo de pré aquecer o ar de regeneração do desumidificador pode melhorar ainda mais os resultados apresentados e trazer maiores economias.

Um dos principais benefícios da desumidificação também está ligado à redução de paradas da máquina, pois a redução da umidade absoluta do ar de saída, evita o acúmulo de pó em tubulações e na câmara de secagem. Dessa forma, a utilização do desumidificador pode gerar resultados imediatos no aumento do fator operacional e redução do tempo de *setup*.

A desumidificação do ar de secagem, conforme mencionado no início deste trabalho, promove, além de economia, a redução da corrosão de todo o sistema de aquecimento, podendo-se citar: dutos e trocadores o que aumenta sua vida útil e previne o crescimento microbiológico sendo este um fator extremamente importante para processos alimentícios e farmacêuticos.

Pela engenharia necessária na construção e todos os fatores abordados, os desumidificadores com sólido dessecante tem um custo de aquisição que pode ser elevado para a grande maioria das empresas de secagem por *spray drying*, principalmente as brasileiras, pois esse nicho de mercado está restrito a poucos fabricantes de capital estrangeiro. Contudo, essa tecnologia promete a entrega de bons resultados, com baixa manutenção e longa vida útil.

Em virtude dos fatos mencionados e conhecimentos obtidos na elaboração do trabalho, pode-se sugerir pesquisas relacionadas ao tema que abordem os seguintes assuntos:

Comparação do ciclo de desumidificação por condensação ao ciclo de adsorção e sua combinação e calcular e comparar o *COP*, que representa a eficiência da roda dessecante, para diferentes materiais adsorventes.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, AIR CONDITIONING AND REFRIGERATING ENGINEERS (ASHRAE). *Handbook of Fundamentals . SI Edition*, 2013. Atlanta, GA.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, AIR CONDITIONING AND REFRIGERATING ENGINEERS (ASHRAE). *Handbook of HVAC Systems and Equipment*. 2016. Atlanta, GA.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, AIR CONDITIONING AND REFRIGERATING ENGINEERS (ASHRAE). *Standard 139 Method of Testing for Rating Desiccant Dehumidifiers Utilizing Heat for the Regeneration Process*, 2007. Atlanta, GA.

APEMA EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS – Manual do trocador aletado RHF-1495x1840-4. 2019.

APV ANHYDRO DIVISION. *Dryer Handbook*. 165 John Deitsch Square, Attleboro Falls, MA. 02763 USA.

BARBOSA, Gleisa Pitareli – **Operações da indústria química: princípios, processos e aplicações** – 1. Ed. – São Paulo, Érica, 2015.

CIENTEC, Relatório de Ensaio. Número: 1514 – 6868 – 25 DE JANEIRO DE 2016

COTES – *Hidden Secret Booklet*. Denmark. 2014.

COTES – *Spray Drying Fluid Bed Booklet*. Denmark. 2014.

ENERGY MODELS. **Psychrometrics**. Disponível em: <<http://energy-models.com/psychrometrics>>. Acesso em: 17 de out. de 2019.

FOOD PROCESSING. **Munters Quantum Desiccant Drying Wheel**. Disponível em: <<https://www.foodprocessing.com.au/content/processing/product/munters-quantum-desiccant-drying-wheel-1132978231>>. Acesso em: 17 de out. de 2019.

GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência. 2002.

GEA *Process Engineering – Handbook of Evaporation and Spray Drying*. 2010. Copenhagen, Denmark.

GHOLAMREZA GOODARZIA, NEELESH THIRUKONDA, SHAHIN HEIDARI, ALIAKBAR AKBARZADEH, ABHIJIT DATE, *Performance Evaluation of Solid Desiccant Wheel Regenerated by Waste Heat or Renewable Energy*. (2017). Energy Procedia, Volume 110. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301959>>

INCROPERA, FRANK P; DEWITT, DAVID P.: **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, 4ª Edição, 1998, LTC Editora.

Informativo Conjuntural. **Emater/RS-Ascar**, Porto Alegre, 28 de fev. de 2019. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/conjuntural/conj_28022019.pdf>. Acesso em: 17 de out. de 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Download de gráficos de estações automáticas – Cidade de Porto Alegre**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 25 de ago. de 2019.

JAYARAMAN, K.S.; DAS GUPTA, D.K. (1992). *Dehydration of fruits and vegetables-recent developments in principles and techniques*. *Drying Technology*.

LEWIS G. HARRIMAN III. *The Dehumidification Handbook*. 2nd ed. Massachusetts: Munters Corporation, 2002.

M. AMDADUL HAQUE; YAKINDRA PRASAD TIMILSENA; BENU ADHIKARI. (2015). *Spray Drying – Drying Technologies for Foods: Fundamentals & Applications*. New India Publishing Agency (NIPA).

MASTERS K. *Spray Drying*, Longman Scientific & Technical and John Wiley & Sons Inc. (Ed.), Essex, UK, 1991.

MASTERS, K. *Handbook of Milk Powder Manufacture*. 1997. Essex, UK.

MUNTERS Europe – *Dehumidification System MX² Plus Operating Manual*. 2015.

MUNTERS Corporation – *Desiccant Wheels, Advanced rotor technology*. 2012.

MUNTERS Corporation – *ICA dehumidifier product guide PG0056-03 01/19*. 2019.

NGUYEN, DUC QUANG; NGUYEN, HA; MOUNIR, SABAH; ALLAF, KARIM. (2017). *Effect of feed concentration and inlet air temperature on the properties of soymilk powder obtained by spray drying*. *Drying Technology*. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2017.1357040?journalCode=ldrt20>>.

PISECKY J. *Handbook of milk powder manufacture*. 1997. Niro A/S (Ed.), Copenhagen, Denmark.

PISECKY J. *Handbook of Milk Powder Manufacture*. 2012. Copenhagen, Denmark.

SHERIF, S.A. *PH.D. Overview of Psychrometrics*. *ASHRAE Journal*, Jun. de 2002. Disponível em: <http://www.handsdownsoftware.com/Overview_of_Psychrometrics.pdf>. Acesso em: 20 de jun. de 2019.

SOMSUK, NISAKORN; WESSAPAN, TEERAPOT; TEEKASAP, S. (2011). *Design and Development of a Rotary Airlock Valve for Using in Continuous Pyrolysis Process to Improve Performance*. *Advanced Materials Research*. Disponível em: <<https://www.scientific.net/AMR.383-390.7148>>.

SPRAYING SYSTEMS – Manual como substituir discos por bicos atomizadores. 2016.

TORREIRA, R. **Fluidos térmicos: água, vapor, óleos térmicos**. São Paulo: Hemus. 2002.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Termometria e Psicrometria, apostilha de medições térmicas Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/medterm/areas/area-i/termometria.pdf>>. Acesso em: 14 de mai. de 2019.

WHAT-WHEN-HOW. **Heat and Energy Wheels**. Disponível em: <<http://what-when-how.com/energy-engineering/heat-and-energy-wheels/>>. Acesso em: 16 de out. de 2019.

WIKIPEDIA. **Sorção**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Sor%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 16 de out. de 2019.