



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E  
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

ARTUR JOSÉ CUNHA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM TÚNEL DE SECAGEM PARA  
MINÉRIOS

Tucuruí, Pará.

2021

ARTUR JOSÉ CUNHA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TÚNEL PARA SECAGEM E EMISSÃO DE MINÉRIO  
EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS CONTROLADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: desenvolvimento energético.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita.

Tucuruí, Pará.

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

J83d José Cunha da Silva, Artur.  
Desenvolvimento e aplicação de um túnel de secagem  
para minérios / Artur José Cunha da Silva. — 2021.  
100 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2021.

1. Túnel de secagem. 2. Cinética de secagem. 3.  
Emissão de poeira. 4. Minério de ferro. 5. Sinter feed. I.  
Título.

CDD 621.4022

---

ARTUR JOSÉ CUNHA DA SILVA


**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM TÚNEL DE SECAGEM PARA  
MINÉRIOS**

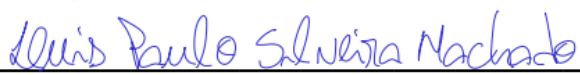
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: desenvolvimento energético.

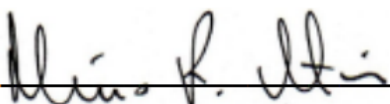
Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita


Aprovada em 15 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita / UFPA – Orientador.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Paulo Silveira Machado / UFPA – examinador interno

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins / UFES – examinador externo.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo / UFOP – examinador externo.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais Izete Costa e José Carlos pelo apoio dado as escolhas tomadas em toda minha vida, agradeço aos meus irmãos e amigos de São Domingos do Capim.

Em segundo lugar, agradeço ao professor e orientador André Mesquita pela oportunidade de participar do projeto Controle de Poeira e pelo compartilhamento de conhecimento e experiência de vida.

Agradeço a todos os alunos e professores envolvidos no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho e boa convivência ao longo destes dois últimos anos.

A engenheira Érika Cristina, minha namorada, pelo amor e companheirismo.

Aos engenheiros Ronaldo Menezes e Pedro Henrique pelos exemplos de competência profissionais.

E agradeço a mineradora Vale pelo financiamento do Projeto Controle de Poeira e pela bolsa dedicada a mim durante o período de pesquisa e desenvolvimento científico.

## RESUMO

### DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM TÚNEL DE SECAGEM PARA MINÉRIOS

A emissão de poeira está presente nas várias etapas da indústria mineral, da extração nas minas ao carregamento dos navios nos portos. O transporte em vagões ferroviários, armazenamento em pátios de estocagem e o manuseio são três grandes fontes emissoras de particulados para a atmosfera. A poeira em suspensão não afeta apenas o ambiente local, pois o vento transporta o particulado e leva transtornos à centros urbanos próximos às malhas ferroviárias e portos. As partículas maiores se depositam nas superfícies, resultando em poluição visual, e as partículas menores, não visíveis, com tamanho entre 10 e  $2,5\mu m$  são facilmente inaláveis e se alojam no tecido pulmonar, podendo provocar irritação ou necrose. A emissão de poeira é potencializada pelas condições atmosféricas locais, que provocam a evaporação da umidade superficial do minério úmido, quebrando as pontes de líquido que mantém as partículas ligadas entre si. Visando o estudo da dinâmica de secagem de minérios, realizou-se o projeto e a construção de um túnel de secagem, composto por um túnel de vento, equipamentos de refrigeração, aquecimento e umidificação que são interligadas por um sistema de supervisão e controle. A utilização da bancada para estudos de secagem utilizando *sínter feed* mostrou-se satisfatória, pois a temperatura se manteve estabilizada no *setpoint* durante o tempo de secagem, refletindo a boa calibração do controlador PID de temperatura. A umidade e a massa de minério foram medidas e registradas automaticamente através de uma balança e um sensor de umidade capacitivo posicionados na seção de testes da bancada. As curvas de secagem apresentaram períodos de taxa constante e taxa decrescente apenas nas condições climáticas mais leves. Nas maiores temperaturas e velocidades foram observados apenas o período à taxa decrescente de secagem, evidenciando a influência das condições do ambiente sobre a dinâmica de secagem. Portanto, este trabalho deixa como contribuição o túnel de secagem para futuras pesquisas e um banco de dados experimentais para calibração de modelos numéricos e formulação de modelos matemáticos para previsão de secagem.

**Palavras-chave:** Túnel de secagem. Cinética de secagem. Emissão de poeira. *Sínter feed*.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENTO AND APPLICATION OF A DYING TUNNEL FOR ORES

A dust emission is present in the various stages of the mineral industry, from extraction in mines to ship loading in ports. Transport in train wagons, storage in stockpiles and handling are three major sources of particulate emissions into the atmosphere. Suspended dust does not only affect the local environment, as the wind transports the particulates and brings disturbances to urban centers close to railway networks and ports. Larger particles are deposited on surfaces, outperforming visual surfaces, and smaller, unresearched particles with a size between 10 and 2.5 $\mu\text{m}$  are easily inhaled and lodge in lung tissue, potentially causing irritation or necrosis. Dust emission is enhanced by local atmospheric conditions, which cause the evaporation of surface moisture from the wet ore, breaking the liquid bridges that keep the particles linked together. Aiming at studying the dynamics of drying ore, a drying tunnel was designed and built, comprising a wind tunnel, cooling, heating and humidification equipment that are interconnected by a supervision and control system. The use of the bench for drying studies using sinter feed is known to be satisfactory, as the temperature remained stabilized at the setpoint during the drying time, reflecting the good calibration of the temperature PID controller. Moisture and ore mass were automatically measured using a scale and a capacitive moisture sensor positioned in the test section of the bench. The constant rate and descending rate drying curves only in the lightest weather conditions. The biggest limitations and variations were observed only in the period with decreasing drying rate, showing the influence of environmental conditions on the drying dynamics. Therefore, this work leaves as a contribution the preparation tunnel for future research and an experimental database for the calibration of numerical models and models of mathematical models for prediction prediction.

**Keywords:** Tunnel dryer. Drying kinetics. Dust emission. Sinter feed.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Perfil de carga nos portos brasileiros em 2020. ....	12
Figura 1.2 - Transporte de Cargas, em Toneladas úteis, em 2019. ....	13
Figura 2.1 - Túnel de secagem de seção aberta em acrílico. ....	17
Figura 2.2 - Túnel de secagem com dimensões detalhadas. ....	17
Figura 2.3 - Curvas de secagem em função do pellet feed e sinter feed. ....	18
Figura 2.4 - Representação da secagem convectiva. ....	19
Figura 2.5 - Curvas de secagem típicas: (a) secagem (b) taxa de secagem. ....	20
Figura 2.6 – Particulado no primeiro período de taxa decrescente. ....	21
Figura 2.7 - Particulado no segundo período a taxa decrescente. ....	21
Figura 2.8 - Distribuição de umidade ao final da secagem. ....	22
Figura 2.9 - Carta psicrométrica simplificada. ....	23
Figura 2.10 - Processos termodinâmicos do ar úmido. ....	25
Figura 2.11 - Refrigeração e desumidificação. ....	26
Figura 2.12 - Processo de aquecimento sensível. ....	28
Figura 2.13 - Processo de umidificação. ....	29
Figura 2.14 - Exemplo de sistema de controle de temperatura. ....	30
Figura 3.1- Diagrama de componentes para o túnel de secagem. ....	32
Figura 3.2 - Dados ambientais de Vitória e Tucuruí. ....	33
Figura 3.3 - Seção de testes. ....	35
Figura 3.4 - Contração. ....	37
Figura 3.5 - Perfil da contração. ....	37
Figura 3.6 - Dimensões principais do difusor. ....	41
Figura 3.7 - Curva perda de carga versus ventilador. ....	43
Figura 3.8 - Banco de resistências com fechamento trifásico 220V. ....	44
Figura 3.9 - Unidade evaporadora da split duto. ....	44
Figura 3.10 - Características técnicas do sensor TUTS-02. ....	45
Figura 3.11 - Características do transmissor de pressão diferencial 850-D. ....	46
Figura 3.12 - Transmissor de pesagem modelo JY-S60. ....	46
Figura 3.13 - Características da Célula de carga SP-20. ....	47
Figura 3.14 - Estrutura para pesagem. ....	47
Figura 3.15 - Dimensões do sensor de umidade. ....	48
Figura 3.16 - Curva de calibração. ....	48
Figura 3.17 - Chave estática tripolar + dissipador de calor. ....	50
Figura 3.18 - Conjunto CLP + módulos de expansão. ....	52
Figura 3.19 - Diagrama de instrumentação do túnel de secagem. ....	53
Figura 3.20 - Lógica de controle. ....	55
Figura 3.21 -- Componentes da malha de controle da velocidade. ....	55
Figura 3.22 - Lógica de controle de temperatura. ....	56
Figura 3.23 - Malha de controle da refrigeração. ....	57
Figura 3.24 - Malha de controle das resistências elétricas. ....	57
Figura 3.25 - Malha de controle da umidificação. ....	58
Figura 3.26 - Perfil de temperatura (a) e umidade relativa (b) durante controle. ....	58
Figura 3.27 - Adaptação e pintura das bases metálicas existentes. ....	59
Figura 3.28 - Contração, seção de estabilização e difusor. ....	59
Figura 3.29 - Instalação do ventilador. ....	60
Figura 3.30 - Posicionamento dos eletrodutos. ....	61
Figura 3.31 - Banco de resistências com fechamento trifásico 220V. ....	61



Figura 3.32 - Ligação delta 18 resistências (16kW) .....	62
Figura 3.33 - Ligação delta de 9 resistências (8,0kW) .....	62
Figura 3.34 - Ligação delta 6 resistências (5,3kW) .....	62
Figura 3.35 - Unidade evaporadora da split duto. ....	63
Figura 3.36 - Acoplamento entre ar-condicionado e ventilador. ....	63
Figura 3.37 - Unidade condensadora. ....	64
Figura 3.38 - Posicionamento dos painéis. ....	64
Figura 3.39 - Painel de carga .....	65
Figura 3.40 - Painel de carga .....	66
Figura 3.41 - Painel de controle .....	66
Figura 3.42 - Painel de carga (a), controle (b) e disjuntores (c). ....	67
Figura 3.43 - Túnel de secagem dimensionado e montado. ....	67
Figura 4.1 - Foto ampliada pellet feed e sínter feed. ....	68
Figura 4.2 - Distribuição granulométrica do sínter feed e pellet feed. ....	69
Figura 4.3 - Strub para análise de amostras em MEV.....	70
Figura 4.4 - Banho de ouro sobre as amostras de minérios.....	70
Figura 4.5 - Partículas de 2,5um em partícula de 20um de sínter feed.....	71
Figura 4.6 - Densidade aparente do pellet feed e sínter feed.....	72
Figura 4.7 - Estados da água sob meio granular.....	72
Figura 4.8 - Configurações para ensaios com sínter feed.....	74
Figura 4.9 - Instrumentação da seção de testes. ....	74
Figura 4.10 - Balança e sensor de umidade.....	74
Figura 4.11 - Curvas de massa e umidade .....	76
Figura 4.12 - Taxa de secagem versus umidade. ....	77
Figura 4.13 - Sintonia PID. ....	79
Figura 4.14 - Posicionamento do bocal de umidificação .....	80
Figura 4.15 - Dados do bocal atomizador .....	80
Figura 4.16 - Células ultrassônicas .....	81
Figura 4.17 - Umidificador ultrassônico. ....	81
Figura 4.18 - Dados técnicos do compressor GPT442MAB.....	82
Figura 4.19 - Compressor inverter Danfoss.....	83
Figura 4.20 - Ruídos na curva de umidade. ....	83
Figura 4.21 - Curva de umidade com filtro de 1h. ....	84
Figura 4.22 – Avaliação de harmônicos 1. ....	84
Figura 4.23 - Avaliação de harmônicos 2 .....	85
Figura 4.24 - Avaliação de harmônicos 3. ....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados de incidência do vento em Vitória, ES. ....	33
Tabela 3.2 - Dados para difusor. ....	41
Tabela 3.3 - Perda de carga total. ....	42
Tabela 3.4 - Resumo dos parâmetros para dimensionamento. ....	43
Tabela 3.5 - Características técnicas do motor do ventilador. ....	49
Tabela 3.6 - Características técnicas do inversor de frequência. ....	49
Tabela 3.7 - Levantamento das entradas e saídas exigidas no projeto. ....	51
Tabela 4.1 - Massa específica pellet e sinter feed. ....	71
Tabela 4.2 - Condições ambientais para ensaios de secagem. ....	73

# SUMÁRIO

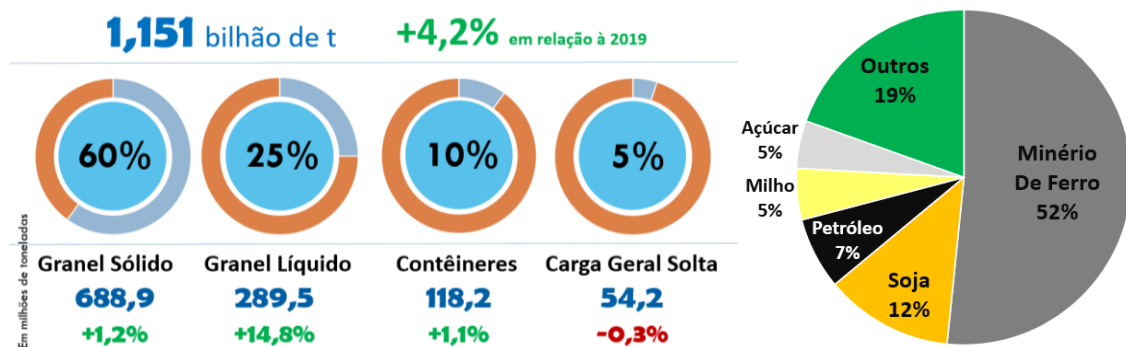
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVO GERAL	15
<b>1.3.1 Objetivos específicos</b>	<b>15</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO</b>	<b>16</b>
2.1 Secagem	16
2.2 Cinética de secagem	18
2.3 Psicrometria	22
2.3.1 Propriedades psicrométricas	24
<b>2.3.2 Processos termodinâmicos do ar úmido</b>	<b>25</b>
2.3.2.1 Refrigeração e desumidificação	26
2.3.2.2 Aquecimento sensível	28
2.3.2.3 Umidificação	28
<b>2.4 Controle de malha fechada</b>	<b>30</b>
<b>3. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE SECAGEM</b>	<b>32</b>
3.1 DIMENSIONAMENTO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS	32
<b>3.1.1 Túnel de vento</b>	<b>34</b>
<b>3.1.2 Contração</b>	<b>36</b>
<b>3.1.3 Câmara de estabilização</b>	<b>38</b>
<b>3.1.4 Difusor</b>	<b>40</b>
<b>3.1.5 Perda de carga total e seleção do ventilador</b>	<b>42</b>
<b>3.1.6 Aquecimento</b>	<b>43</b>
<b>3.1.7 Refrigeração</b>	<b>44</b>
<b>3.1.8 Umidificação</b>	<b>44</b>
3.2 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE	45
<b>3.2.1 Sensores</b>	<b>45</b>
3.2.1.1 Temperatura e umidade relativa	45
3.2.1.2 Transmissor de pressão diferencial	45
3.2.1.3 Transmissor de pesagem e célula de carga	46
3.2.1.4 Sensor de umidade do minério	47
<b>3.2.2 Controladores</b>	<b>49</b>
3.2.2.1 Inversor de frequência	49
3.2.2.2 Atuadores	49
3.2.2.3 Controlador Lógico Programável	51
<b>3.2.3 Diagrama de instrumentação e controle</b>	<b>52</b>
<b>3.2.4 Lógica de controle</b>	<b>54</b>
<b>3.2.5 Controle de velocidade</b>	<b>55</b>
<b>3.2.6 Controle de temperatura e umidade relativa</b>	<b>56</b>
<b>3.3 CONSTRUÇÃO E MONTAGEM</b>	<b>59</b>
<b>3.3.1 Montagem do túnel de vento</b>	<b>59</b>
<b>3.3.2 Montagem do ventilador</b>	<b>60</b>
<b>3.3.2 Montagem das resistências elétricas</b>	<b>61</b>
<b>3.3.3 Montagem do ar-condicionado</b>	<b>62</b>
<b>3.3.4 Painel de comando, carga e proteção</b>	<b>64</b>
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>68</b>
4.1 Caracterização física do síter feed	68
4.2 Curvas de secagem	73
4.3 Testes com umidificador	79
4.4 Testes com ar-condicionado	82
4.5 Interferência no sensor de umidade	83
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>86</b>
5.1 Considerações finais	86
5.2 Sugestão para trabalhos futuros	87
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>88</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

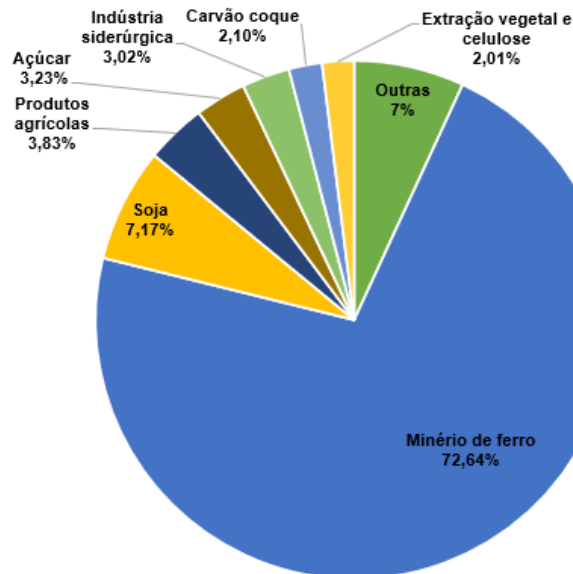
A mineração é um setor industrial que ocupa posição de destaque na economia nacional, tendo relevante participação na composição do Produto Interno Bruto (PIB). Os bens minerais geram emprego e ocupam espaço nas exportações brasileiras, marcadas pela elevada comercialização de *commodities*. Os dados estatísticos divulgados no Anuário Mineral Brasileiro, tendo como base o ano de 2019, mostram que 72,8% do valor total da produção de substâncias metálicas é referente ao segmento do minério de ferro, totalizando R\$ 93,9 bilhões de reais, sendo 89,4% da produção concentrada nos estados do Pará e Minas Gerais.

Os dados divulgados pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ, no relatório estatístico aquaviário de 2020, reforçam a importância do minério de ferro na exportação brasileira. O relatório mostra o crescimento de 4,2% do setor portuário em 2020 em relação a 2019, com a movimentação de 1.151 bilhão de toneladas, em que 60% foram resultados da movimentação de graneis sólidos, de acordo com a Figura 1.1.



**Figura 1.1 - Perfil de carga nos portos brasileiros em 2020.**  
Fonte: (ANTAQ, 2020).

O relatório também destaca que dentre os graneis, o minério de ferro lidera o ranking com 356 milhões de toneladas exportadas, seguido pelo petróleo com 262 milhões de toneladas. No transporte ferroviário, o destaque também é dado ao minério de ferro, que representa quase 3/4 de toda a carga transportada na malha ferroviária brasileira, evidenciada nos dados divulgados pela Agência Nacional de Transportes – ANTT, indicados no gráfico da Figura 1.2.



**Figura 1.2 - Transporte de Cargas, em Toneladas úteis, em 2019.**  
 Fonte: (ANTT, 2010)

Uma vez que há enorme volume de minério exportado, que abrange uma cadeia de suprimentos que se inicia nas minas e termina nos portos, e devido ao fato do minério de ferro apresentar granulometria fina, existe uma preocupação quanto à emissão de poeira, principalmente nas etapas de transporte ferroviário, manuseio e armazenagem nos portos. O minério de ferro úmido e de granulometria fina exposto a condições ambientais se torna uma fonte emissora, visto que a perda de umidade elimina as pontes de líquido que mantêm as partículas unidas entre si, permitindo que sejam arrastadas pelo vento, formando a poeira.

Dentre os materiais particulados em suspensão que afetam a qualidade do ar estão as partículas  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$ , que dispõem de diâmetro menor que 10 e 2,5  $\mu m$ , respectivamente. Estas partículas penetram profundamente nos tecidos pulmonares e no sistema cardiovascular dos seres humanos, aumentando o risco de doenças pela deterioração dos tecidos internos (COPELAND; KAWATRA, 2005). (SOUZA PINTO et al., 2021)

Dentre os métodos utilizados para avaliação da emissão de poeira de granéis, estão os estudos realizados em túnel de vento que replicam condições reais de arraste eólicos em pequena escala, visando prever o tempo de secagem em função da aplicação de água e supressores de poeira, conforme estudo desenvolvido por (SANTOS JÚNIOR, 2018). No entanto, dados mais precisos quanto à influência de cada parâmetro atmosférico sobre a secagem do minério ainda são escassos nas pesquisas. Isso se deve ao fato de os equipamentos apresentarem dependência das

condições externas, que afetam a dinâmica da dos ensaios, que devem ser feitos em ambientes controlados. Visando melhores resultados experimentais nos estudos da secagem de minério de ferro, este trabalho abrange projeto, construção e testes de um túnel de secagem, que permite a simulação de condições climáticas envolvendo temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, semelhante aos registrados nos empreendimentos minerais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A emissão de poeira no transporte ferroviário e portos é preocupante pelo fato dos empreendimentos se localizarem próximos a comunidades ou centros urbanos, que são afetados pela poeira emitida. Na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), ferrovia administrada pela VALE, são praticadas diversas medidas de controle de material particulado, para evitar o seu aporte das pilhas de materiais e vagões transportadores. Dentre as medidas estão a redução da velocidade dos trens nas áreas de comunidades, enclausuramento dos equipamentos nas áreas de transferência de materiais, umidificação dos materiais nos pátios de estocagem, carregamento e transporte, com o uso de supressores de pó junto com a umidificação, formando uma camada protetora do arraste eólico (BORBA, 2017).

O estudo realizado pelo Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (IEMA) e validado pela UFES demonstrou que o setor industrial representa 13% das emissões totais de particulados na região. Dessa parcela, o setor minero-siderúrgico representa cerca de 70%. Se consideradas todas as fontes de emissões atmosféricas da Grande Vitória ES descritas no Inventário, calcula-se que a VALE passou a representar 5% do total. Em vista destes problemas, a mineradora lançou em 2018 o Plano Diretor Ambiental (PDA), contando com mais de 150 projetos de implantações de novos equipamentos, melhorias em controles ambientais, aprimoramento de gestão hídrica e estudos de novas tecnologias para redução das emissões de poeira até 2023.

Diante a escassez de equipamentos e técnicas disponíveis na literatura adequados para a caracterização da emissão de particulados de minérios, a VALE iniciou uma parceria com a Universidade Federal do Pará visando estudar os mecanismos de geração de poeira e desenvolver equipamentos para testes de novas soluções para o controle de poeira oriundos de suas atividades. Desse modo, este

trabalho contempla um dos objetivos do projeto, que compreende o desenvolvimento de um túnel de secagem para determinação da dinâmica de secagem de minérios em ambiente controlado.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

- Projeto e construção de um túnel de secagem.
- Validação do túnel de secagem com base na avaliação da estabilidade das condições climáticas e curvas de secagem de minério sinter feed.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

- Dimensionamento do túnel de vento, ar-condicionado, umidificador e aquecedor.
- Montagem dos equipamentos e implementação do sistema de controle.
- Ensaio de secagem sob diferentes configurações atmosféricas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 Secagem

A secagem é um importante processo de remoção de água de materiais utilizando transferência de calor e transporte de massa. Na indústria química, está entre as operações mais utilizadas, muitas vezes, sendo a última etapa antes da classificação e embalagem dos produtos. Na indústria de alimentos, a secagem é um processo importante para manter o produto estável e seco, reduzindo a atividade microbiológica. Na indústria mineral, secadores são utilizados para remover o excesso de umidade de minérios beneficiados por processos a úmido.

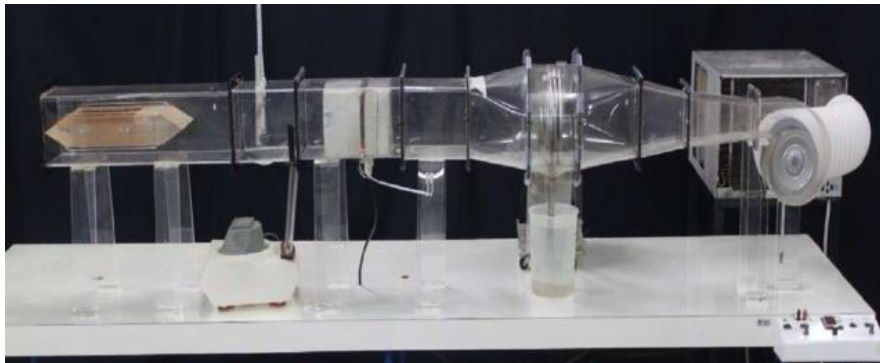
Apesar da extensa variedade de equipamentos utilizados para secagem, este trabalho está centrado na utilização de tuneis secadores de pequeno porte, para pequenas amostras de material dispostas sobre bandejas em uma seção de testes.

Túneis de vento têm sido utilizados para simular a influência das condições atmosféricas sobre a emissão de particulados em vagões de trem e pilhas de estocagem. (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2018b), utilizaram um túnel de vento subsônico de seção aberta para avaliação da emissão de particulados em um vagão metálico na escala de 1:20, preenchido com minério de ferro pellet feed. Os resultados mostraram que a perda de massa é proporcional à velocidade do vento e inversamente proporcional para a umidade do material.

Seguindo linha de pesquisa semelhante, (BORBA, 2017), simulou arraste eólico em modelo de vagões de trem, avaliando diferentes produtos supressores de poeira aplicados sobre a superfície do minério umidificado em 7%. O modelo foi posicionado em uma seção de testes submetido a condições diversas, tais como chuva, insolação, vibração e vento. O estudo concluiu que o filme mais resistente às condições simuladas foi o polímero desenvolvido em parceria com a UFES.

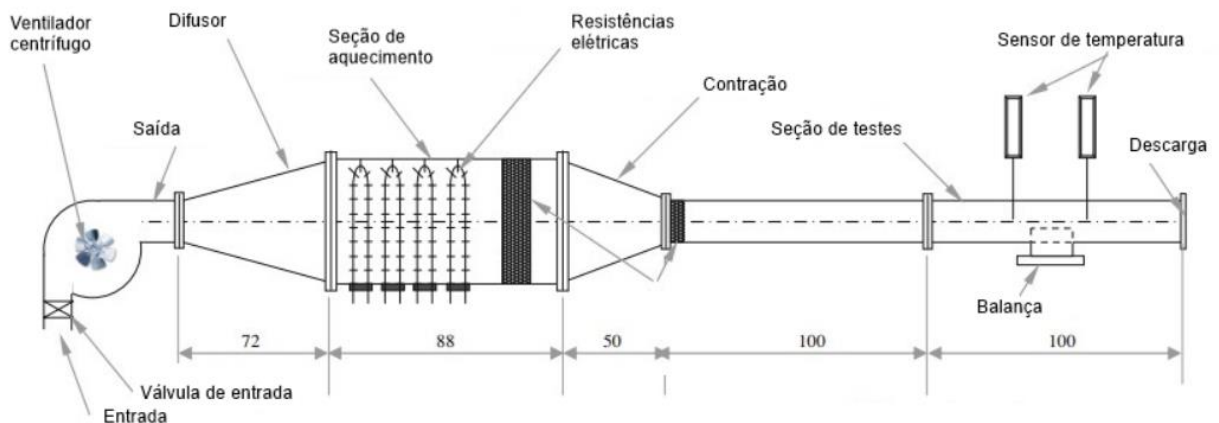
PINTO *et al.*, (2017), utilizaram uma bancada de secagem para avaliação dos mecanismos de secagem de sinter feed de minério de ferro em função das condições ambientais e da espessura do material. O equipamento utilizado é construído em acrílico (Figura 2.1), e composta por um ar-condicionado e aquecedor, permitindo ajuste de temperatura e umidade relativa. O estudo permitiu identificar os mecanismos de água livre, capilaridade e difusão identificados pela descontinuidade das curvas de secagem obtidas.





**Figura 2.1 - Túnel de secagem de seção aberta em acrílico.**  
**Fonte: PINTO *et al.* (2017).**

(MOHAN; TALUKDAR, 2013), utilizaram um túnel de vento equipado com resistências elétricas para avaliar a secagem de batatas. O equipamento é formado por um túnel de vento de seção aberta equipado com resistências elétricas entre o difusor e a contração, de acordo com a Figura 2.2. A massa de batata, posicionada na seção de testes sobre uma balança, foi submetido a temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, a 2m/s. como resultado, destaca-se a inexistência do período à taxa constante de secagem. Observa-se também que a umidade se mantém quase constante em até o tempo de secagem de duas horas, a partir do qual a umidade decai gradualmente.

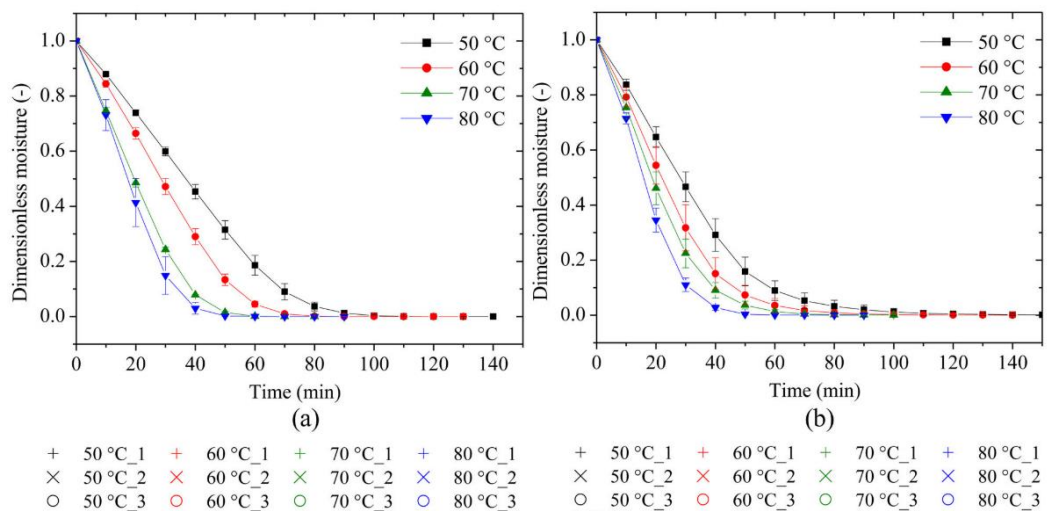


**Figura 2.2 - Túnel de secagem com dimensões detalhadas.**  
**Fonte: (MOHAN, V.P.C. *et al.*, 2013).**

TWIER, A. *et al.*, (2018), estudaram a secagem de tijolos sob diferentes condições ambientes em um túnel de secagem que além do aquecimento, é também equipado com spray de água para umidificação do ar. A avaliação sob diferentes condições mostrou que a temperatura é o fator de maior influência na secagem

enquanto a umidade relativa e velocidade da corrente de ar tem pouca influência sob o tempo de secagem.

PINTO *et al.*, (2021), levantaram experimentalmente as curvas de secagem de minérios de ferro pellet feed e sinter feed sob velocidade de 1m/s e temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C. As umidades iniciais, em base úmida, foram de 18% para o pellet feed e de 11% para sinter feed. As curvas experimentais ajustadas (Figura 2.3) mostram o efeito que da temperatura observado para o pellet feed é o da redução do tempo de secagem em função da elevação da temperatura. O sinter feed apresenta curvas de comportamento semelhante, embora o desvio padrão dos resultados serem maiores. Isto pode ser explicado pela maior presença de partículas grossas no meio, levando a grandes variações da área exposta a secagem.



**Figura 2.3 - Curvas de secagem em função do pellet feed e sinter feed.**

**Fonte: PINTO *et al.*, (2021).**

## 2.2 Cinética de secagem

A secagem é tipicamente descrita como um processo de transferência de calor e massa visando a remoção de umidade de materiais. A secagem convectiva é o processo que utiliza corrente de ar quente como meio de secagem. Quando um material é submetido à secagem térmica, dois mecanismos ocorrem simultaneamente:

1. Transferência de calor entre o meio de secagem e a superfície do material úmido.
2. Transporte interno de umidade por meio da difusão de líquido.

O aquecimento superficial ocorre por condução e convecção na camada limite de velocidade que se forma devido à viscosidade do ar. A evaporação da umidade

superficial é compensada pela migração interna de umidade ocorrida pelo mecanismo de difusão quando há diferença de concentração de umidade entre as camadas mais baixas e as mais altas do material. A transferência de calor e massa são influenciados não apenas pela temperatura do ar de secagem, mas também pela umidade relativa e velocidade, assim como umidade do material e suas propriedades. A representação do processo de secagem convectiva pode ser visualizada na Figura 2.4.

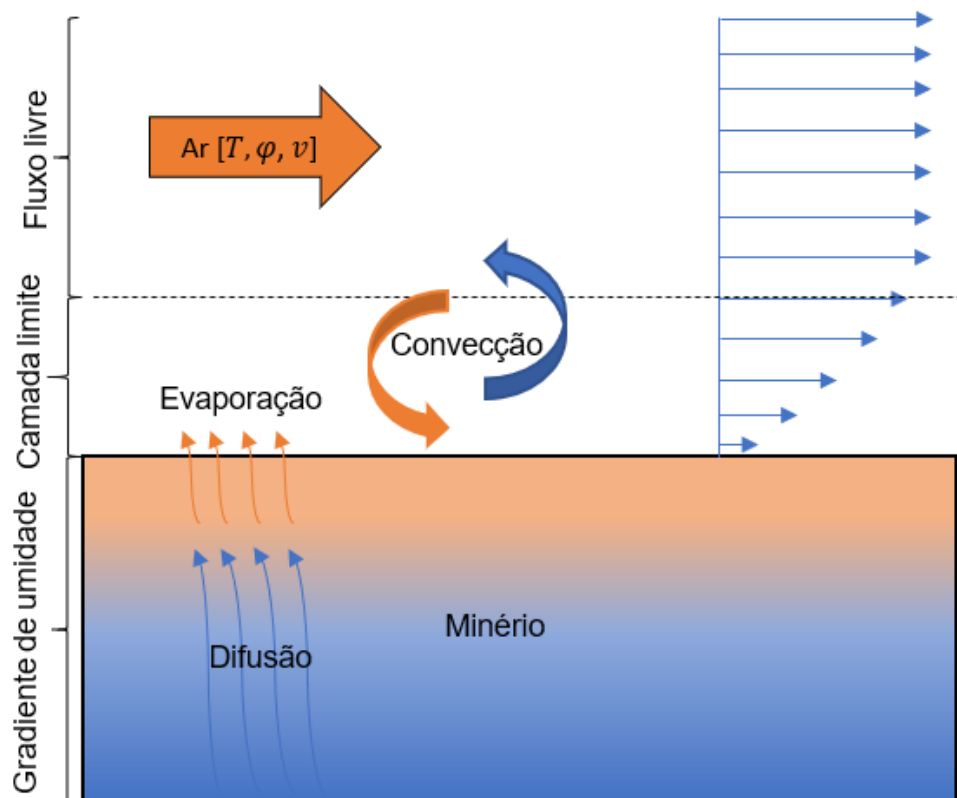
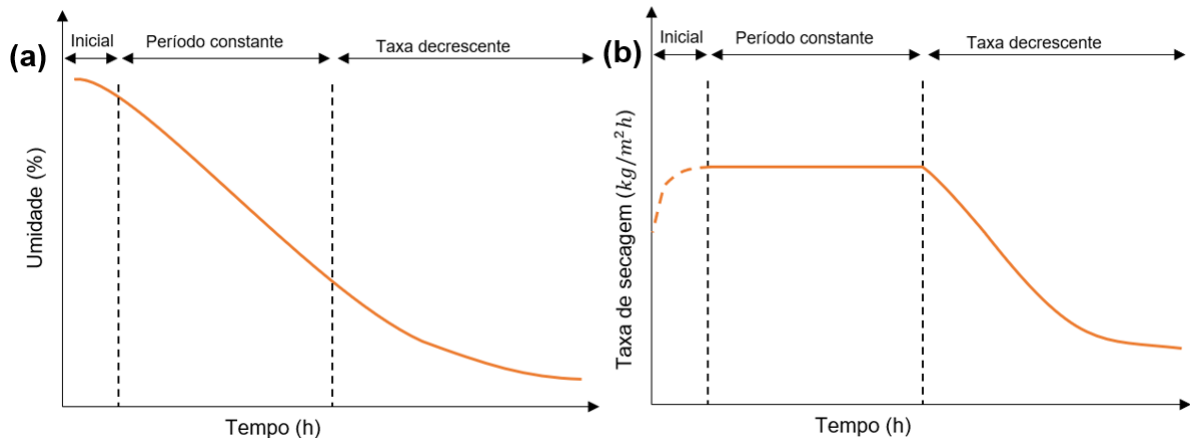


Figura 2.4 - Representação da secagem convectiva.

A cinética da secagem é normalmente representada por curvas isocinéticas, uma vez que são obtidas em temperatura constante, que relacionam a umidade em função do tempo de secagem (Figura 2.5(a)). Inserindo a medição da massa do material, também é possível caracterizar a cinética por meio da taxa de secagem em função do tempo (Figura 2.5 (b)).



**Figura 2.5 - Curvas de secagem típicas: (a) secagem (b) taxa de secagem.**

Conforme mostrado na Figura 2.5, a secagem pode ser basicamente dividida em 3 períodos distintos:

O período inicial é caracterizado pela acomodação do material à condição de secagem, quando a temperatura se ajusta a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense a transferência de massa. A duração deste período em relação aos próximos é insignificante por ocorrer em um curto período.

Se a umidade inicial do sólido for suficientemente grande, água livre estará presente em todo o meio granular e a secagem ocorrerá como evaporação de uma massa de líquido, sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. O mecanismo de transporte de líquido, e, portanto, a velocidade deste movimento, varia acentuadamente com a própria estrutura do sólido. Nos sólidos que têm espaços vazios e abertos relativamente grandes, o movimento será, possivelmente, controlado pela tensão superficial e pelas forças da gravidade no interior do sólido (FOUST, 1982). Nesta fase, o equilíbrio se dá com a massa evaporada da superfície sendo substituída pelo líquido que vem do interior do sólido. Por esta razão a secagem é dependente apenas das condições ambientais externas e o estágio é denominado de período à taxa constante de secagem (ZHANG; YANG; LIU, 1999).

No instante em que toda a umidade começa a abandonar as camadas superiores, se inicia o segundo período de taxa decrescente. A continuação da secagem envolve uma distância cada vez maior para a difusão de calor e de massa. O vapor, nos níveis mais internos da amostra sólida, difunde-se para a superfície que não está saturada e continua a difundir-se para a corrente gasosa. Esse mecanismo é muito lento em comparação com a transferência convectiva que ocorre

na superfície saturada (FOUST, 1982). A Figura 226 apresenta um material particulado no primeiro período de secagem, na qual destaca-se o início da formação de regiões secas entre partículas.



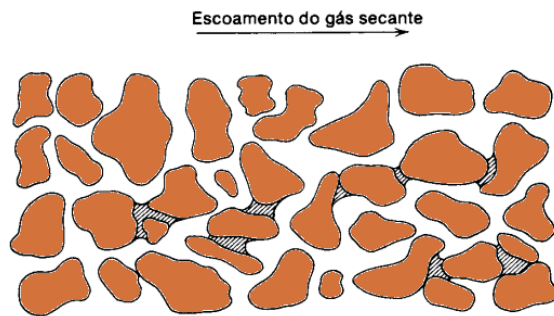
**Figura 2.6 – Particulado no primeiro período de taxa decrescente.**  
Fonte: (FOUST, 1982).

O segundo período de secagem apresenta um sistema com duas regiões distintas, uma região úmida e uma região seca, conforme se apresenta na Figura 2.7. Dentro da região úmida, água livre encontra-se meio as partículas e o principal mecanismo de transferência é de fluxo capilar, força viscosa e força inercial. Na região seca, toda água apresenta-se no estado de água ligada e o principal mecanismo de transferência da água ligada é o da transferência de vapor (ZHANG; YANG; LIU, 1999).



**Figura 2.7 - Particulado no segundo período a taxa decrescente.**  
Fonte: (FOUST, 1982).

Em baixas umidades, a superfície de secagem real é dispersa e descontínua, e o mecanismos que controla a taxa de secagem é o da difusão de calor e de massa através do sólido poroso (FOUST, 1982). No final da secagem, a umidade se encontra em pequenas bolsas, em poros pequenos espalhados por todo o sólido, conforme Figura 2.8, caracterizando a umidade de equilíbrio.



**Figura 2.8 - Distribuição de umidade ao final da secagem.**  
**Fonte: (FOUST, 1982).**

A curva (a) e (b) da Figura 2.5 podem ser obtidas pela medição da massa úmida em intervalos regulares através de uma balança ou sensor de umidade. Segundo (MUJUMDAR, 2014) a taxa de secagem pode ser expressa pelo delta de umidade em intervalos regulares e a massa inicial dividida pela área superficial em contato com o ar de secagem, conforme Equação 2.1.

$$T_s = \frac{m dU}{A dt} \quad (2.1)$$

Em que,

$T_s$  é a taxa de secagem expressa em  $g/m^2 \cdot min$  ou  $kg/m^2 \cdot h$ .

$m$  é a massa úmida, em  $kg$  ou  $g$ .

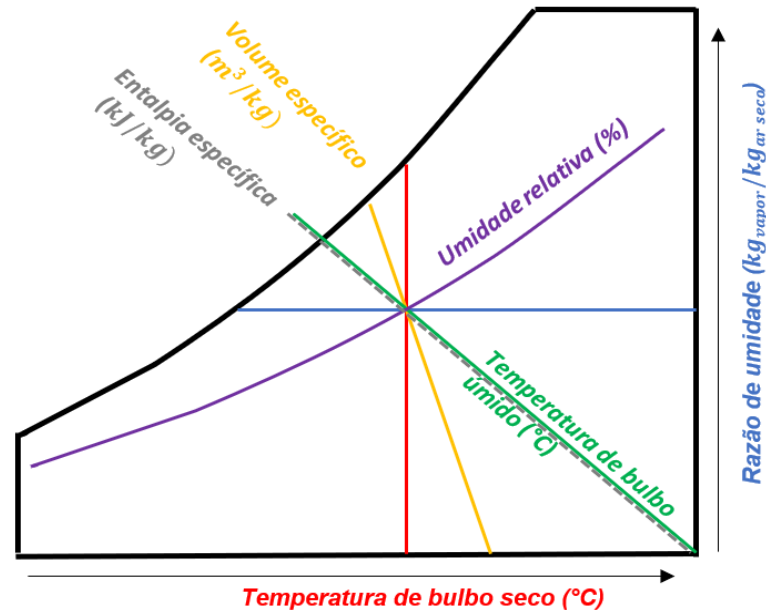
$A$  é a área superficial em contato com o ar quente, em  $m^2$ .

### 2.3 Psicrometria

A base para o desenvolvimento do túnel psicrométrico está centrada na psicrometria, considerada como a ciência que estuda e determina as propriedades termodinâmicas e características do ar, sendo este considerado como mistura de ar seco e vapor d'água. O conhecimento das propriedades psicrométricas é o básico necessário para medições ambientais e dimensionamento de equipamentos, sendo uma área do conhecimento fundamental para a climatização de ambientes.

As propriedades termodinâmicas do ar úmido são: pressão de vapor, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, ponto de orvalho, razão de umidade, umidade relativa, volume específico e entalpia. O comportamento das propriedades pode ser observado em um gráfico de vários eixos, denominado carta

psicrométrica, que apresenta o comportamento dos parâmetros em função de pontos máximos e mínimos, de acordo com a Figura 2.9.



A temperatura de bulbo seco está localizada na linha horizontal inferior, com sentido de aumento da esquerda para a direita. A razão de umidade está no eixo vertical de baixo para cima. A umidade relativa é composta por várias linhas curvas, cada qual para um valor de umidade constante. A temperatura de bulbo úmido e o ponto de orvalho são projetadas no eixo curvado da extremidade esquerda da carta. E por fim, a entalpia acompanha a linha de temperatura de bulbo úmido.

A carta psicrométrica representada na Figura 2.1, é um resumo visual do comportamento das propriedades do ar úmido e deve ser utilizada como ferramenta de avaliação inicial dos parâmetros. Para dados mais precisos, são necessárias equações baseadas na termodinâmica.

Ao longo dos anos, várias equações foram desenvolvidas tendo como base duas propriedades independentes. Normalmente uma das duas propriedades é a temperatura de bulbo úmido e a segunda pode ser a umidade relativa, volume específico, entalpia etc. Visto que a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa serão os parâmetros de entrada para o dimensionamento do túnel psicrométrico, serão abordadas a seguir as formulações para a determinação de parâmetros úteis para o dimensionamento deste trabalho.

### 2.3.1 Propriedades psicrométricas

A pressão de saturação ( $P_{ws}$ ), em kPa, é uma propriedade essencial para cálculos psicrométricos, visto que a umidade relativa e a umidade absoluta podem ser determinadas a partir deste parâmetro. Existem diversas fórmulas da pressão de saturação para diferentes faixas de temperatura, no entanto, este trabalho utilizará a equação simples e precisa desenvolvida por (DILLEY, 1968). que abrange a faixa de temperatura de 0°C a 63°C, dada na Equação 2.2 em que ( $T$ ) é a temperatura em graus célsius.

$$P_s = 610,78 \exp \left[ \frac{17,269T}{237,3 + T} \right] \quad (2.2)$$

A razão de umidade ( $w$ ) é dada pela razão entre a massa de vapor d'água presente na massa de ar seco, conforme Equação 2.3:

$$W = \frac{m_w}{m_a} \quad (2.3)$$

Utilizando a lei dos gases ideais e manipulando a Equação 2.3, a razão de umidade é dada em termos da pressão de saturação conforme Equação 2.4 em que  $P_w$  é a pressão de vapor em kPa e  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica também em kPa.

$$W = 0,62198 \frac{P_w}{P_{atm} - P_w} \quad (2.4)$$

A Equação 2.8 também pode ser reorganizada para que a pressão de vapor seja calculada a partir da razão de umidade e da pressão atmosférica de 101,325kPa e da umidade absoluta ( $w$ ) em  $kg_{vapor}/kg_{ar\ seco}$ .

$$P_w = \frac{P_{atm}W}{0,62198 + W}$$



Ainda pela lei dos gases ideais aplicada ao ar úmido, o volume específico ( $v$ ) pode ser determinado pela Equação 2.5.

$$v = \frac{287,05(T_{bs} + 273,16)}{P_{atm}} \left( 1 + \frac{W}{0,62198} \right) \quad (2.5)$$

A entalpia presente do ar úmido depende da temperatura e da umidade absoluta, utilizando conceitos de calor específico a pressão constante, a entalpia pode ser calculada pela Equação 2.6.

$$h = 1,006T + W(2501 + 1,77T) \quad (2.6)$$

A utilização da Equação 2.6 limita-se a faixa de temperatura de bulbo seco entre  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3.2 Processos termodinâmicos do ar úmido

Os processos psicrométricos são modelados pela aplicação do balanço de massa e de energia em um fluxo de ar deslocando-se de, normalmente, de uma entrada à uma saída passando através de um trocador de calor ou resistências elétricas. Os principais processos termodinâmicos são visualizados na carta psicrométrica representada na Figura 2.10.

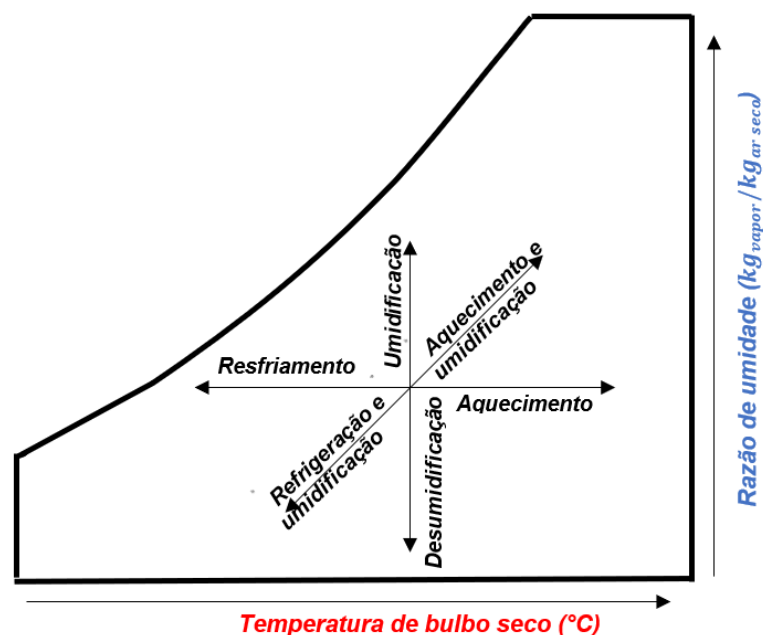


Figura 2.10 - Processos termodinâmicos do ar úmido.

Visto que este trabalho está centrado nos processos de Aquecimento sensível, Refrigeração e desumidificação e Umidificação, estes serão os processos abordados a seguir.

### 2.3.2.1 Refrigeração e desumidificação

No processo de refrigeração e desumidificação, conforme ilustrado na Figura 2.11, o fluxo de ar é soprado através de uma serpentina de resfriamento. Tanto temperatura como umidade são reduzidas no processo. A temperatura devido ao calor sensível trocado e a umidade devido a condensação, uma vez que a temperatura da serpentina é inferior a temperatura de saturação do ar.

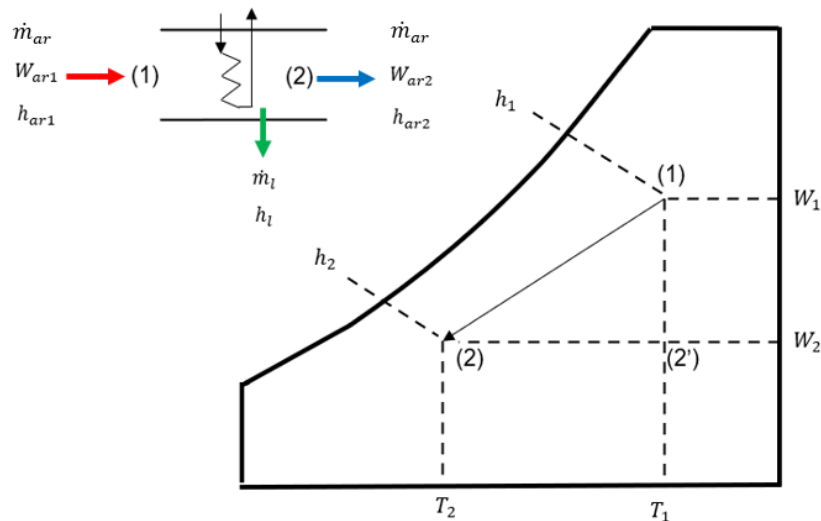


Figura 2.11 - Refrigeração e desumidificação.

Modelando o processo como um volume de controle com uma única entrada e uma única saída, o resultado do balanço de massa é dado a seguir:

$$\dot{m}_{ar}W_1 = \dot{m}_{ar}W_2 + \dot{m}_l$$

Em que,

$\dot{m}_{ar}$  é a vazão mássica de ar úmido, em  $kg/s$ .

$W_1$  é a umidade absoluta na entrada, em  $kg_{vapor}/kg_{ar\ seco}$ .

e  $\dot{m}_l$  a vazão mássica de condensado, em  $kg/s$ .

Isolando a vazão de condensado ( $\dot{m}_l$ ):

$$\dot{m}_l = \dot{m}_{ar}(W_1 - W_2)$$

O balanço de energia resulta em:

$$\dot{m}_{ar}h_1 = \dot{m}_{ar}h_2 + \dot{Q}_{ref} + \dot{m}_lh_l$$

Isolando  $\dot{Q}_{ref}$  e substituindo  $\dot{m}_l$ , tem-se a Equação 2.7 para o cálculo da potência de refrigeração:

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_{ar}(h_1 - h_2) + [(W_1 - W_2)h_l] \quad (2.7)$$

Em que,

$\dot{m}_{ar}$  é a vazão mássica do ar úmido;

$W_1$  e  $W_2$  são as entalpias de entrada e de saída.

$h_1$ ,  $h_2$  e  $h_l$  são as entalpias de entrada, saída e do condensado, respectivamente, em  $kJ$ ;

A Equação 2.7 deixa claro que o processo envolve calor sensível e calor latente. Na carta da Figura 2.11, os calores sensível e latente podem ser calculados a partir do produto da vazão mássica com a diferença de entalpia em cada etapa do processo. Em vista disso, o calor total também pode ser calculado pela soma dos calores sensível e latente:

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{Q}_{sensível} + \dot{Q}_{latente}$$

Em que o calor sensível pode ser calculado pela Equação 2.8:

$$\dot{Q}_{sensível} = \dot{m}_{ar}(h_2 - h_1) \quad (2.8)$$

E o calor latente pela Equação 2.9:

$$\dot{Q}_{latente} = \dot{m}_{ar}(h_1 - h_2) \quad (2.9)$$

### 2.3.2.2 Aquecimento sensível

O processo de aquecimento sensível é caracterizado pela elevação da temperatura de bulbo seco mantendo-se a razão de umidade constante, uma vez que o processo não envolve calor latente, conforme Figura 2.12.

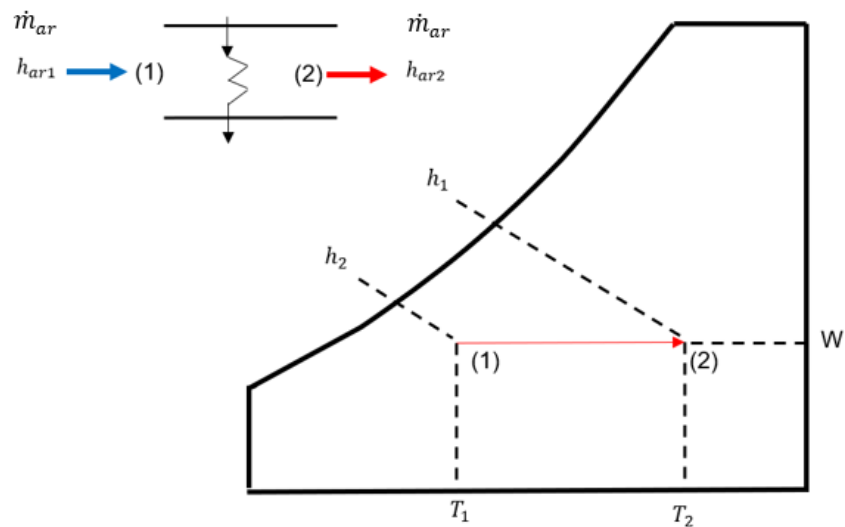


Figura 2.12 - Processo de aquecimento sensível.

Novamente assumindo o volume de controle com uma entrada e uma saída, apenas, o balanço de energia do processo resulta na Equação 2.10:

$$\dot{Q}_{\text{aquecimento}} = \dot{m}_{ar}(h_1 - h_2) \quad (2.10)$$

Em que a potência de aquecimento é produto somente da entalpia inicial em final, em  $(kJ/kg)$  e a vazão mássica de ar úmido em  $kg/s$ .

### 2.3.2.3 Umidificação

A umidificação em escala industrial ou comercial pode ser obtida por basicamente três formas diferentes: utilizando vapor, gerado por aquecimento de água; por injeção de água atomizada por bicos de pulverização; ou por injeção de gotículas de água formadas por células ultrassônicas.

A Figura 2.13 mostra que a umidificação por vapor segue o processo de (1) para (2), enquanto a utilização de água líquida segue o processo (1) a (2'). A direção

dos processos é definida unicamente pela entalpia da água, seja no estado líquido ou vapor.

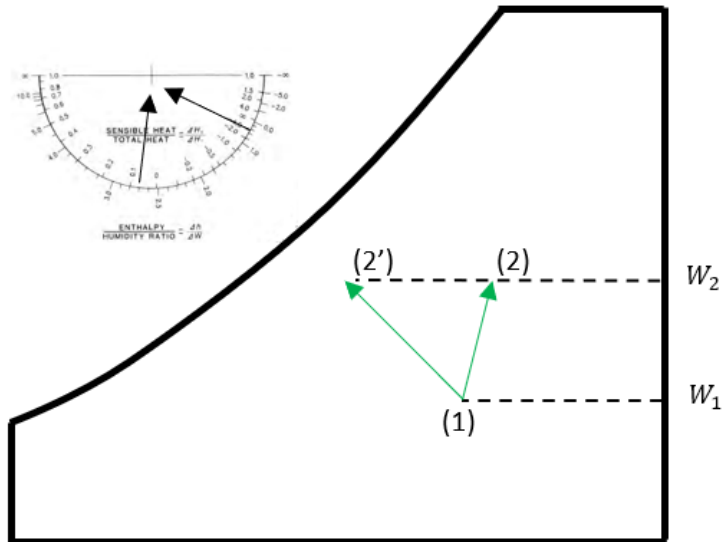


Figura 2.13 - Processo de umidificação.

Aplicando-se o princípio da conservação da energia e da conservação da massa em um volume de controle fixo, com uma entrada e saída e um ponto de injeção de fluido para umidificação, tem-se a Equação 2.11 e Equação 2.12:

$$\dot{m}_{ar}h_1 + \dot{m}_l h_l = \dot{m}_{ar}h_2 \quad (2.11)$$

Em que,

$\dot{m}_{ar}$  é a vazão mássica de ar úmido, em  $kg/s$ ;

$\dot{m}_l$  é a vazão mássica do fluido de umidificação, em  $kg/s$ ;

$h_1, h_2$  e  $h_l$  são as entalpias de entrada, saída e do fluido, respectivamente, em  $kJ$ ;

E o balanço de massa:

$$\dot{m}_{ar}W_1 + \dot{m}_l = \dot{m}_{ar}W_2 \quad (2.12)$$

Isolando-se a vazão de fluido  $\dot{m}_l$ , vazão mássica para umidificação pode ser determinada apenas pela diferença entre as umidades absolutas e a vazão mássica do ar úmido, conforme Equação 2.13.

$$\dot{m}_l = \dot{m}_{ar}(W_2 - W_1) \quad (2.13)$$

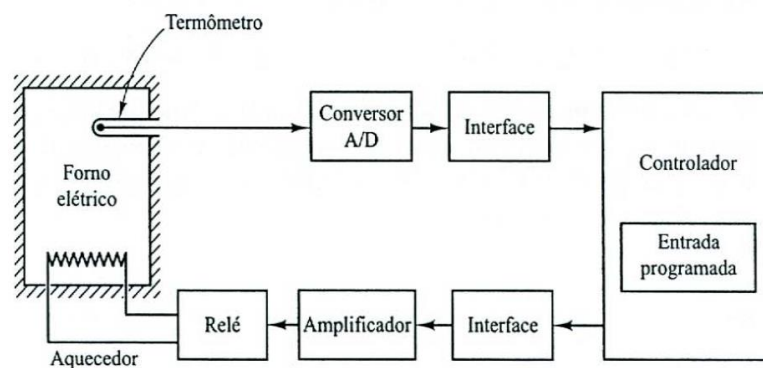
E combinando as equações 2.11 e 2.13, obtém-se a direção do processo em função da entalpia da fase utilizada, seja vapor ou líquido, dado pela Equação 2.14.

$$h_l = (h_2 - h_1)/(W_2 - W_1) \quad (2.14)$$

#### 2.4 Controle de malha fechada

Segundo (OGATA, 2010) um sistema que estabeleça uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, é denominado *sistema de controle com realimentação*, ou *sistema de controle de malha fechada*. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação, realimenta o controlador, de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado.

O termo 'controle de malha fechada' sempre implica a utilização do controle com realimentação para reduzir o erro do sistema. Um exemplo poderia ser o sistema de controle de temperatura de um forno elétrico, conforme ilustrado na Figura 2.14. Medindo-se a temperatura do forno com um termômetro e comparando-a com a temperatura de *setpoint* (temperatura desejada), o controlador envia um sinal para o relé ativar ou desativar a resistência de aquecimento, de modo que assegure que a temperatura do forno permaneça em um nível confortável, independente das condições exteriores.



**Figura 2.14 - Exemplo de sistema de controle de temperatura.**  
**Fonte: (OGATA, 2010).**

O algoritmo que atua sobre o erro para minimizá-lo e mantê-lo constante é conhecido como PID, abreviação para Proporcional, Integral e Derivativo.

Na ação de controle proporcional, a saída do controlador é diretamente proporcional ao erro atuante. Sua saída depende apenas da amplitude do erro, sendo o controlador simplesmente um amplificador do ganho constante. Seja  $u(t)$  o sinal de saída do controlador mediante ao erro  $e(t)$  atuante.

$$u(t) = K_p e(t)$$

Na ação de controle integral, a correção aumenta em relação não só ao erro, mas também ao tempo pelo qual esse erro persiste. A ação elimina o erro residual de regime permanente “*offset*”, que ocorre com a utilização de um controlador puramente proporcional. Seja  $T_i$  o tempo integral, a saída de controle integral é dada por:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

A ação de controle derivativa permite rápida reposta a uma taxa de variação do erro atuante. Portanto, esse tipo de controle prevê o erro atuante e inicia uma ação de corretiva antecipada antes que o erro se torne muito elevado (OGATA, 2010). Seja  $T_d$  o tempo derivativo, a equação que fornece a saída do controle derivativo é dada por:

$$u(t) = T_d \frac{d_e(t)}{d_t}$$

O sinal de controle  $u(t)$  gerado pelo controlador PID pode ser dado pela Equação 2.15:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{d_e(t)}{d_t} \quad (2.15)$$

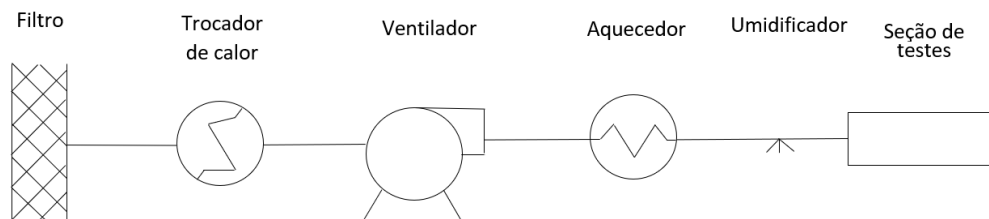
Na prática, a o valor das constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são determinadas experimentalmente, seguindo-se o método da curva de reação de (ZIEGLER; NICHOLS, 1942) ou (COHEN; COON, 1953).

### 3. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE SECAGEM

Para a definição da estrutura e dos equipamentos para a bancada, o projeto deve atender aos seguintes requisitos básicos:

1. Fornecer fluxo de ar constante e sem perturbações em uma seção de ensaio.
2. Fornecer fluxo de ar em temperatura e umidade relativa constantes ao longo do tempo de secagem.

Para atender ao primeiro requisito, optou-se pela utilização de um túnel de vento subsônico de seção aberta, uma vez que sua estrutura é projetada para que o fluxo de ar seja o mais estável em uma seção de testes. Para atender ao segundo requisito, são necessários utilizar equipamentos para aquecimento, resfriamento e umidificação, visto que as condições de saída não devem ser influenciadas pelas variações das condições climáticas locais. Um esquema dos equipamentos é apresentado na Figura 3.1.

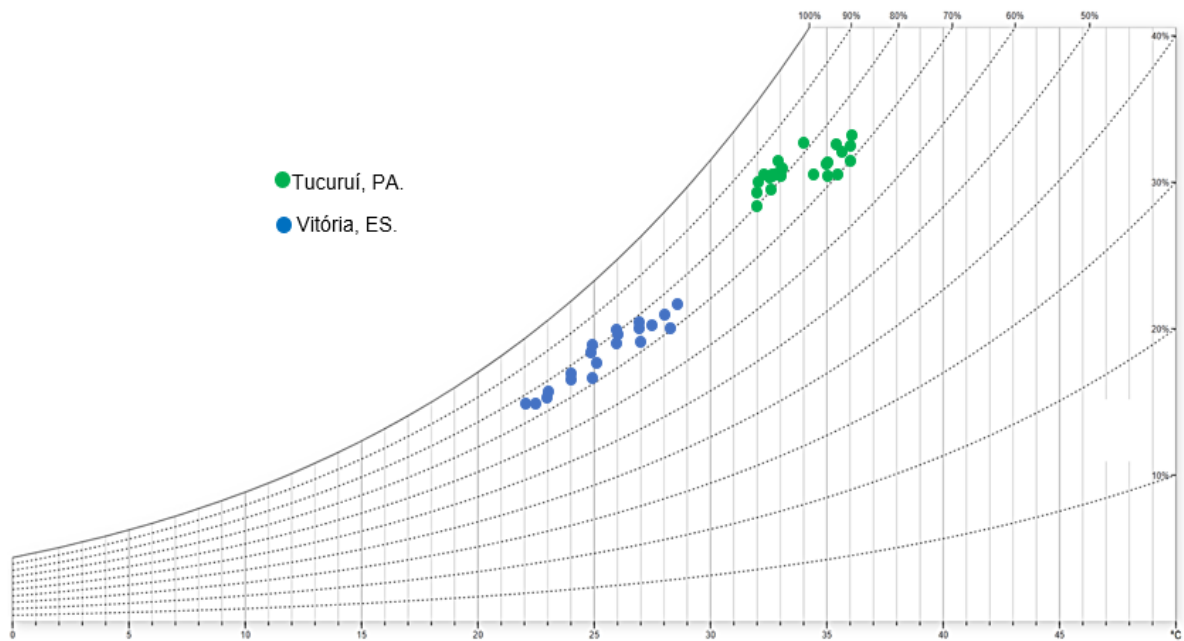


**Figura 3.1- Diagrama de componentes para o túnel de secagem.**

#### 3.1 DIMENSIONAMENTO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Visto que o túnel deve simular condições atmosféricas reais que se apresentam nas instalações do porto de Vitória, no estado do Espírito Santo, e em razão de o Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados estar localizado na cidade de Tucuruí, sudeste do estado do Pará, as séries históricas médias mensais de temperatura e umidade relativas aos anos de 2019 a 2020 foram solicitados para o INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Os dados registrados pelas estações climáticas de Tucuruí e Vitória são indicados na carta psicrométrica da Figura 3.2.





**Figura 3.2 - Dados ambientais de Vitória e Tucuruí.**  
**Fonte: INMET, 2021.**

Apresentando características de clima equatorial, Tucuruí apresenta elevadas temperaturas e umidades relativas ao longo dos anos. A faixa de temperatura média registrada no período está entre 33 e 37°C e a umidade relativa entre 70 e 85%. A região sudeste tem clima basicamente tropical e Vitória apresentou faixa de temperatura de 23 a 29°C e umidade relativa entre 70% e 80%.

A incidência mensal máxima e mínima do vento em Vitória entre 2019 e 2020 é dada na Tabela 3.1, em que a máxima velocidade relativa de 5,3m/s ocorreu em setembro de 2019 e a mínima de 1,7m/s ocorreu em dezembro do mesmo ano.

**Tabela 3.1 - Dados de incidência do vento em Vitória, ES.**

Data	V. máx. (m/s)	V. mín. (m/s)	Data	V. máx. (m/s)	V. mín. (m/s)
31/01/2019	4,8	2,1	31/01/2020	5,1	1,8
28/02/2019	4,8	1,7	29/02/2020	4,3	1,5
31/03/2019	4,2	1,6	31/03/2020	3,8	1,3
30/04/2019	4,0	1,4	30/04/2020	3,4	-
31/05/2019	3,3	1,2	31/05/2020	3,6	-
30/06/2019	3,9	1,2	30/06/2020	3,6	-

31/07/2019	3,6	1,4	31/07/2020	-	-
31/08/2019	4,5	1,4	31/08/2020	4,5	-
30/09/2019	5,3	1,8	30/09/2020	4,6	1,8
31/10/2019	4,9	1,9	31/10/2020	4,7	-
30/11/2019	5,2	1,6	30/11/2020	4,3	-
31/12/2019	4,7	1,7	31/12/2020	4,7	-

Fonte: INMET, 2021.

### 3.1.1 Túnel de vento

Túneis de vento são construídos para se obter fluxo de ar mais estável e paralelo possível ao longo da seção de testes. Segundo (BARLOW; WILLIAM H. RAE; POPE, 1999), a seção de testes é o ponto inicial de projeto de um túnel de vento e deve ser dimensionado em função dos custos de construção, operação e finalidade do projeto.

Tomando em conta a redução de custos de fabricação do túnel, selecionou-se uma seção de testes retangular com lados de 300mm x 200mm. A seção retangular permite melhor apoio aos instrumentos para medição de massa e umidade da amostra e material para secagem. O comprimento da seção de testes foi definido como três vezes o diâmetro hidráulico da seção retangular, conforme recomendado por (BELL; RABBINDRA D. MEHTA, 1988), que indicam a faixa de 0,5 a 3,0 vezes o diâmetro hidráulico  $D_h$ , que pode ser determinado pela equação 3.1.

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (3.1)$$

Em que ( $A$ ) é a área de seção transversal e ( $P$ ) é o perímetro.

Definiu-se pelo comprimento igual a três vezes o diâmetro hidráulico, uma vez que estudos futuros com diferentes configurações e mais de um leito podem ser realizados na seção de testes.

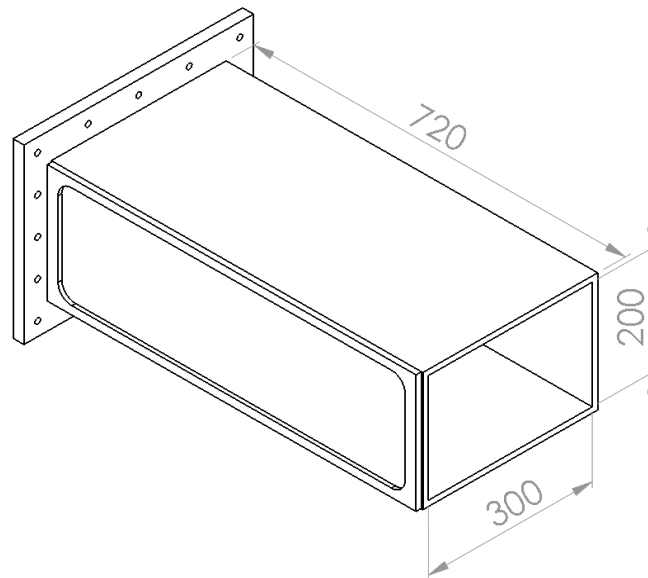
Logo,

$$D_h = \frac{4 \cdot (0,2 \cdot 0,3)}{2 \cdot (0,2 + 0,3)} = 240mm$$

$$L_S = 3 \cdot 240\text{mm} = 720\text{mm}$$

Portanto, as dimensões da seção de testes são de 200mm x 300mm x 720mm.

A seção de testes também conta com abertura lateral para visualização dos experimentos, além de um flange para conexão com a contração, conforme Figura 3.3.



**Figura 3.3 - Seção de testes.**

A perda de carga ao longo e na saída da seção de testes, é calculada pela Equações de Darcy - Weisbach (Equação 3.2), em que se determina o coeficiente de atrito pela equação de Colebrook - White (Equação 3.3).

$$\Delta_p = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_i^2}{2} \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3.3)$$

Em que,

- $f$  é o fator de atrito em cada componente;
- $L$  é o comprimento da seção, em metros;
- $D$  é o diâmetro hidráulico de cada seção, em metros.
- $\epsilon$  é a rugosidade do material empregado no túnel, em metros.

- $\rho$  é a massa específica do ar, em  $kg/m^3$  ;
- $V_i$  é a velocidade em cada componente, em metros.

### 3.1.2 Contração

A contração é a peça responsável por unir a seção de estabilização e a seção de testes, tendo como função reduzir a área de seção transversal sem proporcionar descolamento de camada limite e perturbações no fluxo e ar.

O parâmetro que determina o fator de redução da seção transversal é conhecido como razão de contração. É obtido pela razão da área da seção de entrada ( $A_{se}$ ) pela área da seção de saída ( $A_{ss}$ ), dada pela Equação 3.4:

$$c = A_{se}/A_{ss} \quad (3.4)$$

Considerando as dimensões da seção de entrada como 500mm x 40mm e as dimensões da seção de saída já definidas no item 3.1, define-se a razão de contração equivalente a 3,33.

O comprimento total da contração é definido com base na recomendação dada por Mehta (1977), que sugere a relação informada pela Equação (3.5).

$$0,67 \leq \frac{L}{2H_1} \leq 1,79 \quad (3.5)$$

Em que,

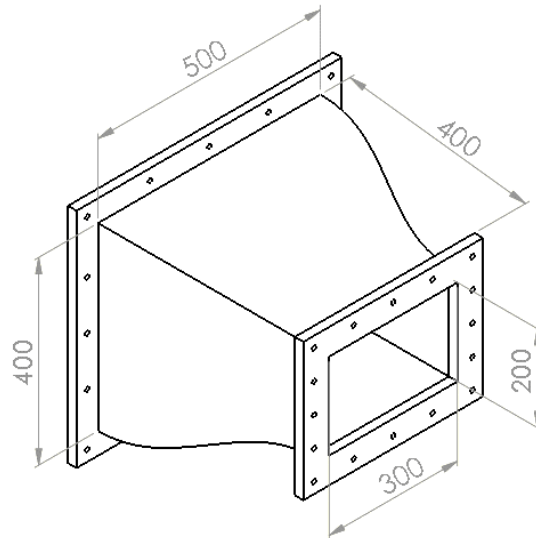
- $L$  é o comprimento do bocal de contração, e
- $H_1$  é a dimensão da metade da largura ou altura da seção de entrada.

Para o comprimento ( $L$ ) de 400mm, tem-se:

$$0,67 \leq 1 \leq 1,79$$

$$0,67 \leq 0,8 \leq 1,79$$

Os valores encontrados estão dentro da faixa indicada por (MEHTA, 1977), logo o comprimento do bocal de contração definido foi de 400mm. A Figura 3.4 mostra as dimensões da contração.



**Figura 3.4 - Contração.**

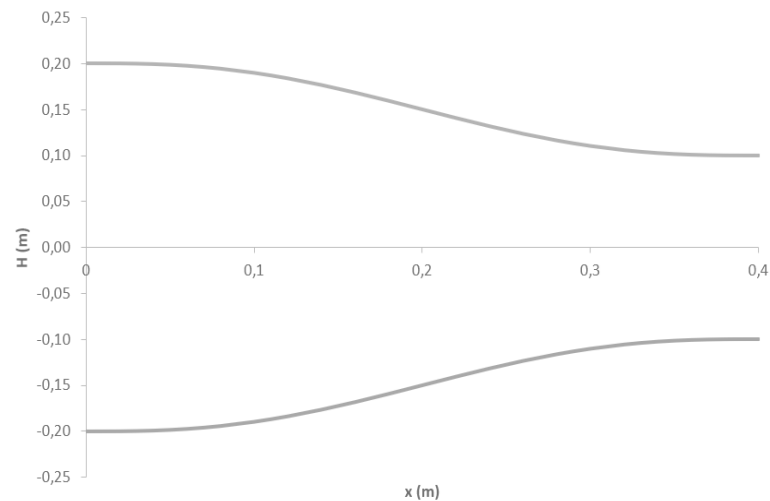
Por fim, utilizando o polinômio de 5ª ordem dada por (BELL; RABBINDRA D. MEHTA, 1988) dado na Equação 3.6,.

$$Y(X) = H_i - (H_i - H_e)[6(X')^5 - 15(X')^4 + 10(X')^3] \quad (3.6)$$

Em que,

- $H_i$  é metade da altura na entrada, em metros;
- $H_e$  é a metade da altura na saída, em metros;
- $X'$  é a razão da distância na direção  $X$  e o comprimento  $L$  da seção.
- $X$  é a distância ponto a ponto ao longo do comprimento da seção.

Obtém-se o perfil de contração indicado na Figura 3.5.



**Figura 3.5 - Perfil da contração.**

A perda de carga na contração pode ser definida pela equação de Darcy-Weisbach utilizando o diâmetro hidráulico de entrada na equação, como segue Equação 3.7:

$$\Delta_{p\text{contração}} = k_c \frac{\rho V_i^2}{2} \quad (3.7)$$

Em que  $k_c$  é o coeficiente de perda de pressão na contração proposta por (WATTENDORF, 1938), como segue na Equação 3.8:

$$k_c = 0,32f \frac{L}{D_{hent}} \quad (3.8)$$

Sendo,

- $f$  o fator de atrito médio na entrada e saída da contração;
- $L$  o comprimento da contração;
- $D_h$  o diâmetro hidráulico na entrada da contração.

### 3.1.3 Câmara de estabilização

A seção de estabilização, localizada entre a saída do difusor e a entrada da contração, é o componente do túnel de vento que possui a maior área de seção transversal. Essa seção tem a maior influência na qualidade do escoamento obtido na seção de teste, devido à alta queda de pressão local gerada por elementos retificadores de fluxo. Em função da maior área, a velocidade na seção de estabilização é a menor ao longo do túnel de vento, o que torna importante posicionar tais elementos retificadores nesta seção, uma vez que a contribuição dos mesmos para a perda total de pressão é minimizada (SANTOS JÚNIOR, 2015).

A qualidade do escoamento está baseada no bloqueio criado pela tela, logo, a seleção do diâmetro do fio e o espaçamento entre telas tornam-se importantes

Para as telas, (MEHTA; BRADSHAW, 1979) sugerem porosidade entre 0,6 e 0,8. Assim, optou-se pela tela de aço galvanizado com diâmetro de fio ( $d$ ) de 0,45mm

e espaçamento entre fios ( $M$ ) de 2,08mm. Utilizando a Equação 43.9, a porosidade encontrada foi de 0,61.

$$\beta_t = \left(1 - \frac{d}{M}\right)^2 \quad (3.9)$$

A Equação 3.10 adotada para estimar o coeficiente de perda de carga ( $K_t$ ) foi desenvolvido por (WIEGHARDT, 1953).

$$Kt = 6,5 \left[ \frac{1 - \beta_t}{\beta_t^2} \right] (Re_\beta)^{-1/3} \quad (3.10)$$

$$Kt = 0,12$$

Em que,

- $Re$  é o número de Reynolds.
- $\beta_t$  é a porosidade.

Visando baixo custo e facilidade no aspecto construtivo da colmeia, optou-se pela utilização de canudos plásticos com diâmetro 10mm e espessura de 0,05 mm.

Adotando a recomendação de (KULKARNI; SAHOO; CHAVAN, 2011) em que a atenuação da intensidade de turbulência nas células da colmeia é alta até a distância de cerca de 8 vezes o diâmetro hidráulico da célula, adotou-se 80mm para o comprimento de cada célula da colmeia

E a perda de carga, calculada pela Equação 3.11.

$$K_h = \lambda_h \left( \frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left( \frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left( \frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (3.11)$$

Em que,

- ( $D_h$ ) é o diâmetro hidráulico;
- ( $L_h$ ) é o comprimento da célula.

E  $\lambda_h$  definida por:

$$\lambda_h = \begin{cases} 0,375 \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0,4} Re_{\Delta}^{-0,1} & Re_{\Delta} \leq 275 \\ 0,214 \left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0,4} & Re_{\Delta} > 275 \end{cases}$$

A largura e altura da câmara de estabilização foram obtidas durante o dimensionamento do bocal de contração e para dimensionar o comprimento da seção utilizou-se a expressão desenvolvida por (MEHTA; BRADSHAW, 1979), que afirmam que a distância entre as telas deve ser de 0,2 vezes o diâmetro hidráulico da seção de testes ( $D_{hse}$ ). Assim, como a seção de testes contará com duas telas e a colmeia considerada como uma terceira tela, o comprimento da seção de estabilização é de 350mm calculado pela Equação 3.12.

$$L_{se} = [0,2 \cdot D_{hse} \cdot (N_{telas} + N_{colmeia})] + L_{colmeia} \quad (3.12)$$

### 3.1.4 Difusor

O difusor reduz a velocidade do ar com o mínimo de perdas possíveis, levando em consideração que a perda está associada ao ganho de pressão. Como as dimensões da seção de estabilização já estão definidas, então deve-se definir a menor seção do difusor em função das dimensões de descarga do ventilador.

Selecionando a descarga do ventilador com 300mm x 200 mm e utilizando a Equação 3.13 dada por (BARLOW; WILLIAM H. RAE; POPE, 1999) o comprimento do difusor é de 450mm.

$$L_D = (R_i) \left[ \frac{A^{0,5} - 1}{\tan(\theta_e)} \right] \quad (3.13)$$

Em que,

- ( $R_i$ ) o raio hidráulico na entrada do difusor;
- ( $\theta_e$ ) ângulo de expansão do difusor;
- ( $A$ ) área de entrada.

Os dados para dimensionamento da contração estão indicados na Tabela3.2.

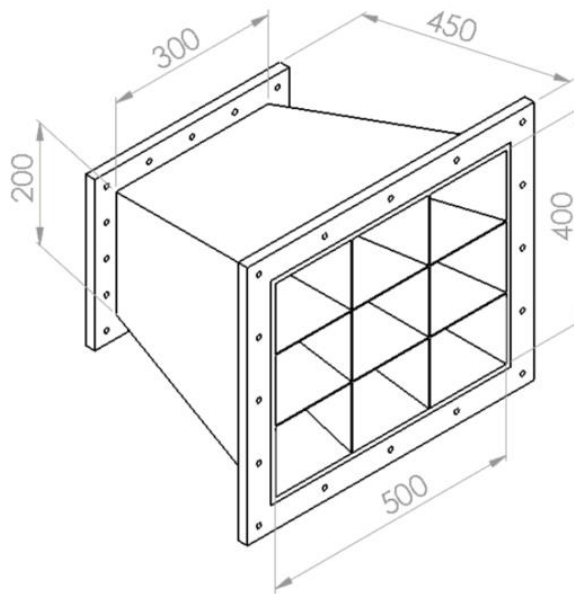


**Tabela 3.2 - Dados para difusor.**

Dados		
<b>Ar</b>	3,33	Adm.
<b>2θ</b>	25	Projeto
<b>θ</b>	12,5	graus
<b>R<sub>i</sub></b>	0,12	m
<b>L<sub>d</sub></b>	0,45	m

Fonte: autoria própria.

Com intuito de evitar a separação de camada limite, utilizaram-se placas divisórias laterais e horizontais no interior do difusor, conforme indicado na Figura 3.6. A melhoria trazida por esta aplicação pode ser encontrada no trabalho desenvolvido por (CALAUTIT et al., 2014).

**Figura 3.6 - Dimensões principais do difusor.**

A perda de carga em um difusor ( $k_d$ ) normalmente é composta por uma parcela devido ao atrito ( $k_f$ ) e outra por perda de expansão ( $k_{exp}$ ). (BARLOW; WILLIAM H. RAE; POPE, 1999) propõe as Equações 3.14 e 3.15 para cálculo de  $k_f$  e  $k_d$ , respectivamente.

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A^2}\right) \frac{f}{8 \sin \theta_e} \quad (3.14)$$

$$K_{ex} = K_e(\theta_e) \left( \frac{A-1}{A^2} \right)^2 \quad (3.15)$$

Em que o fator de atrito pode ser estimado utilizando o número de Reynolds na estrada do difusor e o coeficiente  $K_e(\theta_e)$  pode ser estimado em função do ângulo de expansão do difusor, utilizando pelos limites a seguir.

$$K_e(\theta_e) = \begin{cases} 0,09623 - 0,004152\theta_e, & 0 < \theta_e < 1,5^\circ \\ 0,1222 - 0,04590\theta_e + 0,02203\theta_e^2 + 0,003269\theta_e^3 \\ -0,0006145\theta_e^2 - 0,000028\theta_e^5 + 0,00002337\theta_e^6, & 1,5^\circ < \theta_e < 5^\circ \\ -0,01322 + 0,05866\theta_e, & \theta_e > 5^\circ \end{cases}$$

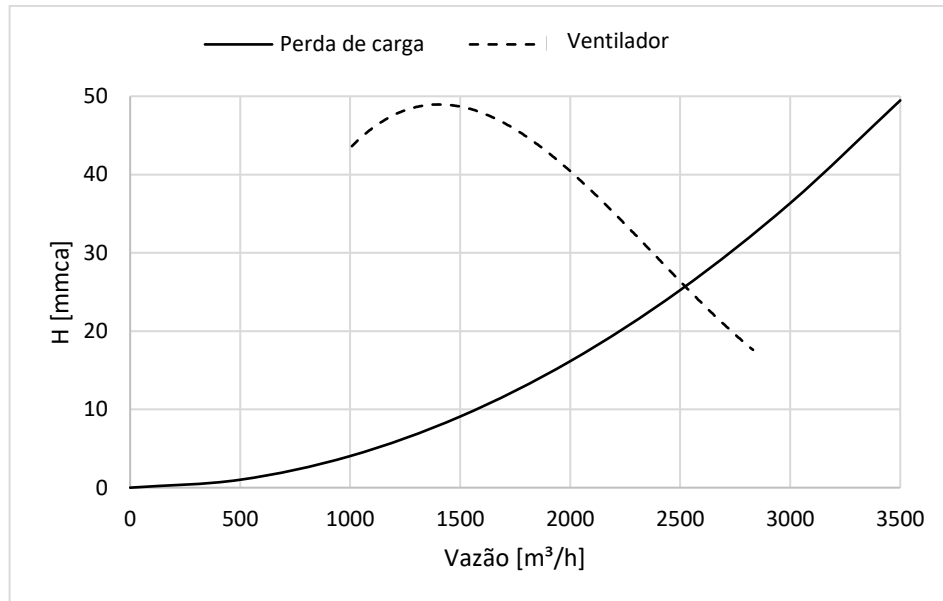
### 3.1.5 Perda de carga total e seleção do ventilador

A Tabela 3.3 indica a perda de carga em cada componente e a perda de carga total do túnel de vento.

**Tabela 3.3 - Perda de carga total.**

<b>Componente</b>	<b><math>\Delta P</math> [Pa]</b>	<b><math>\Delta P</math> [mmca]</b>
Descarga	74,42	7,59
Seção de testes	5,60	0,57
Contração	0,23	0,02
Estabilização	0,12	0,01
Colmeia	0,84	0,09
Telas	1,62	0,17
Difusor	29,19	2,98
Aquecedor	111,62	11,38
<b>Total</b>	<b>149,23</b>	<b>22,80</b>

O ventilador selecionado para atender a perda de carga do túnel é o *Limit Load* RLS315 OTAM de simples sucção e descarga retangular, com dimensões detalhadas no Anexo C ao final deste trabalho. A curva de acoplamento entre ventilador e perda de carga do túnel é representada na Figura 3.7.



**Figura 3.7 - Curva perda de carga versus ventilador.**

### 3.1.6 Aquecimento

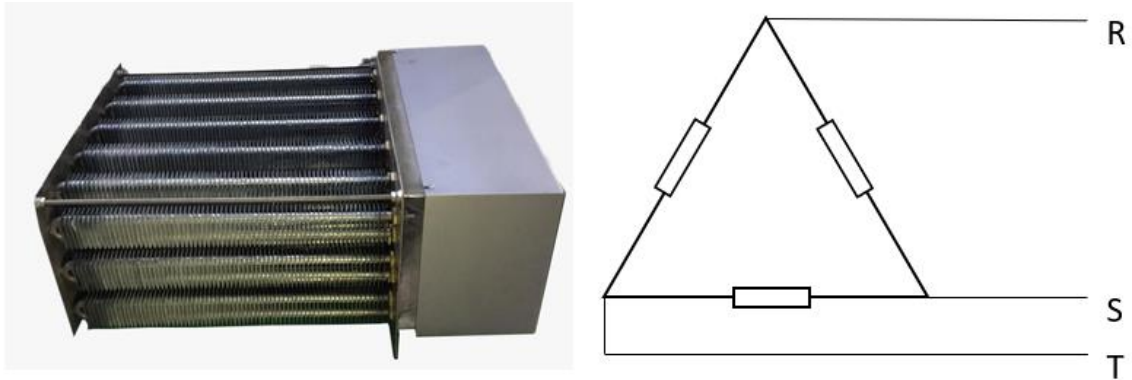
A Tabela 3.4 destaca as máximas e mínimas temperaturas, umidades relativas e velocidades obtidas pelo levantamento indicado na Tabela 3.1 e representados na Figura 3.2.

**Tabela 3.4 - Resumo dos parâmetros para dimensionamento.**

	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)
Máxima	5,3	37	85
Mínima	1,7	23	70

Fonte: autoria própria.

Logo, utilizando-se a Equação 2.14, determinou-se a potência de aquecimento necessária ao projeto como 5,12kW. Considerando futuras aplicações, que exigem maiores faixas de temperaturas para secagem de materiais, optou-se por utilizar um conjunto de aquecimento formado por 18 resistências elétricas tubulares aletadas com potência total de 16kW, ligadas com fechamento 220V trifásico, conforme Figura 3.8. O conjunto possibilita o fácil ajuste de potência a partir das conexões de fácil acesso. E a potência solicitada pode ser estimada em função da Equação 2.14 tomando como base a faixa de temperatura desejada.



**Figura 3.8 - Banco de resistências com fechamento trifásico 220V.**

### 3.1.7 Refrigeração

Considerando as condições de máxima temperatura e umidade de Tucuruí (37 e 75%) e de Vitória (23 e 78%), utilizando a Equação 2.11 definiu-se a carga de refrigeração de 16kW ou 54KBTU/h. O equipamento split duto é o modelo mais adequado para o projeto, visto que a saída é mais aberta e permite fácil instalação de duto para conduzir ar frio para os demais componentes da bancada, conforme Figura 3.9.



**Figura 3.9 - Unidade evaporadora da split duto.**

### 3.1.8 Umidificação

Para as mesmas condições dadas no item Tabela 3.4, as umidades absolutas em Tucuruí e Vitória são, respectivamente  $0,0303\text{kg/kg}$  e  $0,0137\text{kg/kg}$ . A vazão mássica é dada pela área da seção de testes ( $0,2\text{m} \times 0,3\text{m}$ ), a máxima velocidade registrada no período e a massa específica na condição inicial. Nestas condições

utilizando a Equação 2.17 obtém-se a vazão de  $23\text{kg/h}$ . A fase da água para umidificação pode ser vapor, água atomizada ou mesmo gotículas geradas por ondas ultrassônicas.


## 3.2 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE

A instrumentação se refere a todos os sensores, atuadores e controladores que estão instalados no corpo do túnel de vento, registrando, atuando e gerenciando, respectivamente a operação do conjunto de equipamentos que compõe o túnel de secagem.

### 3.2.1 Sensores

#### 3.2.1.1 Temperatura e umidade relativa

Utilizam-se sensores combinados de temperatura e de umidade relativa para medição na aspiração do ar ambiente, ou seja, na entrada do ar-condicionado e na seção de testes. Na seção de testes, serão instalados dois sensores combinados, o primeiro na saída da contração e o segundo na saída da seção de testes. Isso se deve a futuras investigações de balanço de massa que podem ser feitas na secagem de minérios. O sensor utilizado é o modelo TUTS-02 fornecido pela Samrello, com saída de 0 a 10V para temperatura e umidade relativa. A Figura 3.10 mostra um resumo das características técnicas do sensor empregado.



<b>Alimentação</b>	15 até 30Vcc
<b>Consumo</b>	6mA
<b>Saída / faixa temperatura °C</b>	0 ~ 7Vcc / 0 ~ 70°C
<b>Saída / faixa umidade relativa UR%</b>	0 ~ 10Vcc / 0 ~ 100%
<b>Precisão na medição temperatura °C</b>	± 1,5 °C
<b>Precisão na medição umidade relativa UR)</b>	4 % @ 25°C e 60% RH
<b>Temperatura de armazenamento</b>	-10 ~ 60°C
<b>Umidade de armazenamento</b>	menor 95 % U.R (não condensado)
<b>Montagem / Fixação</b>	caixa tubular / pêndulo

**Figura 3.10 - Características técnicas do sensor TUTS-02**

**Fonte: Samrello.**

#### 3.2.1.2 Transmissor de pressão diferencial

O transmissor de pressão diferencial é utilizado em conjunto a um tubo de Pitot posicionado na seção de testes. O conjunto tem a finalidade de medir a velocidade em função da raiz quadrada da diferença entre pressão estática e pressão de estagnação medida pelas tomadas do Pitot. Adotou-se o transmissor modelo

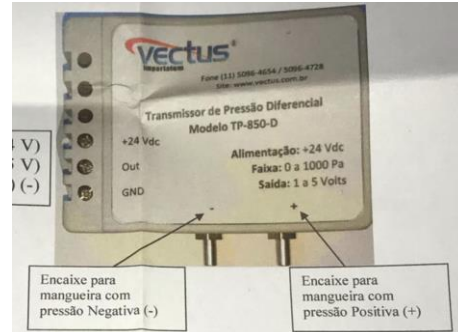
Autotran-850-D fornecido pela Alfavec. A Figura 3.11 resume as principais características técnicas do transmissor adquirido.

**RANGE DE PRESSÃO DIFERENCIAL : de 0 a 1 kPa = 0 a 1000 Pascals**

Alimentação exclusiva 24 VDC  
 Resistência ôhmica ilimitada ( não possui referencia GND)  
 Consumo máximo 684 miliwatts ( 30 mA)  
 Resistência ôhmica ilimitada ( não possui referencia GND)  
 Exatidão  $\pm 1\%$  do fundo de escala  
 Temperatura de operação de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$   
 Repetibilidade:  $\pm 0.3\%$  do fundo de escala nominal  
 Faixa de temperatura compensada de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  (acima ou abaixo desta faixa a variação pode ser de  $\pm 2\%$  do fundo de escala)

**Saída : 1 a 5 VOLTS**

Umidade de operação : menor que o ponto de orvalho  
 Utilização : Ar seco, gás não condutivo e inerte  
 Dimensões 115 X 110 X 35 mm



**Figura 3.11 - Características do transmissor de pressão diferencial 850-D.**  
**Fonte: Alfavec.**

### 3.2.1.3 Transmissor de pesagem e célula de carga

Utiliza-se o transmissor de pesagem modelo JY-S60 com alimentação de 24VDC e saída linear de 0 a 5V, 0 a 10V ou 4 a 20mA. A Figura 3.12 apresenta o transmissor utilizado.



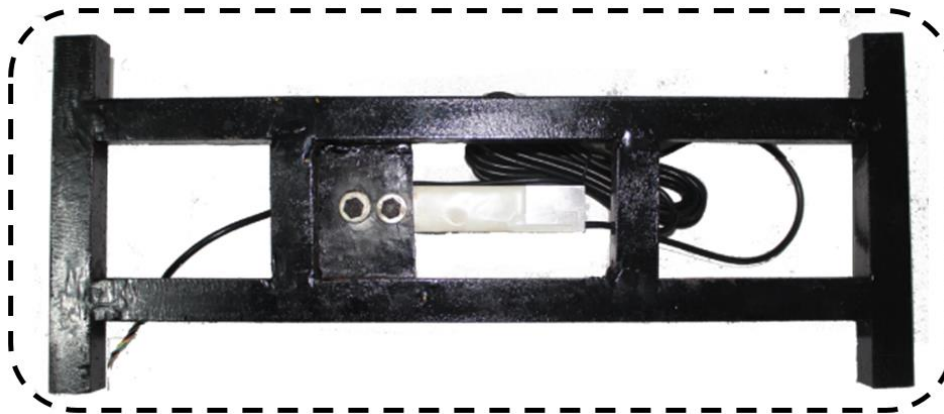
**Figura 3.12 - Transmissor de pesagem modelo JY-S60**

A célula de carga utilizada em conjunto ao transmissor acima, possui capacidade de 20kg, modelo SP20 fornecido pela AEPH. A tabela indicada na Figura 3.13 apresenta as principais características da célula utilizada.

<i>Material</i>	Alumínio Anodizado
<i>Sensibilidade</i>	2,00 mV/V +/- 10%
<i>Dimensão Máxima da Plataforma de Pesagem</i>	400 X 400 mm
<i>Não Linearidade</i>	< 0,02% FSO
<i>Histerese</i>	< 0,02% FSO
<i>Creep ou Fluência</i>	30 Min: <0,03% FSO 8 H: <0,05% FSO
<i>Equilíbrio do Zero</i>	+/- 3%
<i>Faixa de Temperatura Operacional</i>	-10°C a +60°C
<i>Faixa de Temperatura Nominal (Compensada)</i>	-5°C a +50°C
<i>Maximo Erro de Excentricidade</i>	0,03%
<i>Efeito da Temperatura na Calibração</i>	0,025% FSO
<i>Efeito da Temperatura no Zero</i>	0,025% FSO
<i>Sobrecarga Segura (Sem Ruptura)</i>	150 % FSO
<i>Sobrecarga de Ruptura</i>	300 % FSO
<i>Tensão Recomendada</i>	5 a 10 V
<i>Tensão Máxima de Excitação VDC Ou VCA</i>	15 V
<i>Resistência Elétrica Entrada</i>	410 $\Omega$ +/- 30 $\Omega$
<i>Resistência Elétrica Saída</i>	351 $\Omega$ +/- 3 $\Omega$
<i>Resistência de Isolação (50 V)</i>	> 2 G $\Omega$
<i>Grau de Proteção</i>	IP-67
<i>Cabo Blindado 4 X 24 AWG</i>	3,0 m

**Figura 3.13 - Características da Célula de carga SP-20.**  
Fonte: AEPH.

Para montagem do sistema de pesagem, desenvolveu-se uma estrutura metálica em perfil L 20mm x 20mm. A Figura 3.13 apresenta uma vista superior do conjunto de pesagem desenvolvido.



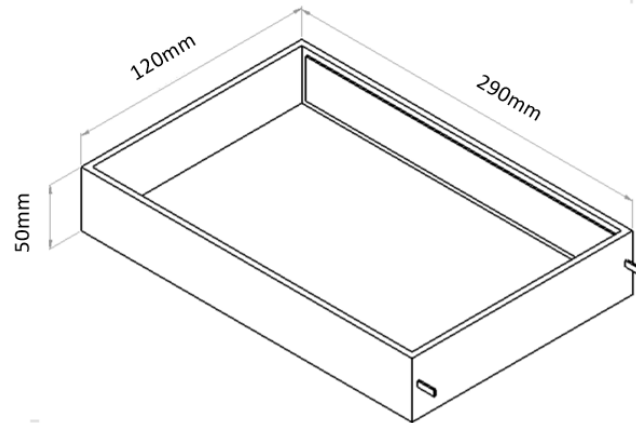
**Figura 3.14 - Estrutura para pesagem.**

A linha tracejada indica a posição do prato da estrutura, feito de chapa de aço de 1mm de espessura. O peso da estrutura é de 1,8kg.

#### 3.1.3.4 Sensor de umidade do minério

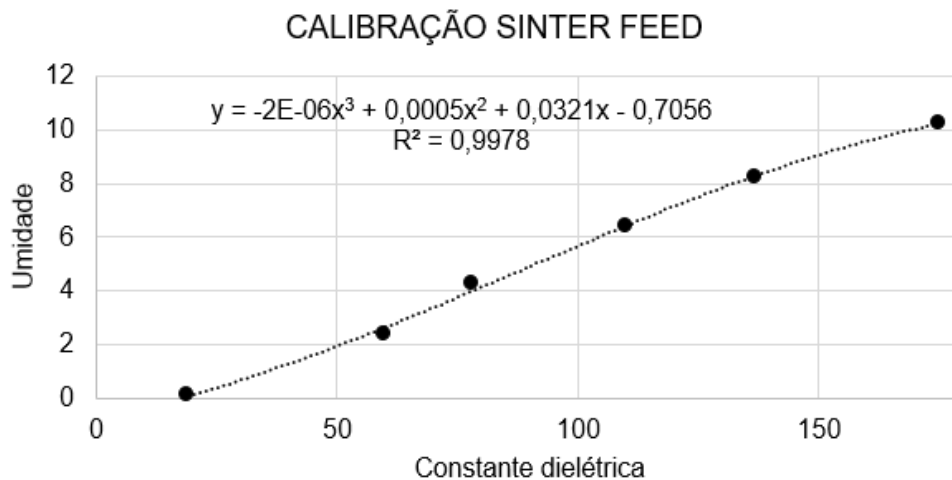
Utiliza-se um sensor capacitivo desenvolvido segundo metodologia proposta por (RÊGO SEGUNDO *et al.*, 2019) para medição instantânea de umidade. O sensor

é composto por um recipiente de acrílico e duas placas de aço posicionadas nas lateralmente. A umidade é obtida por meio da medição da constante dielétrica, utilizando o *método Real-Dual-Frequency*. As dimensões do sensor são mostradas na Figura 3.15.



**Figura 3.15 - Dimensões do sensor de umidade.**

Para utilização adequada do sensor, é necessário calibrar para cada material a ser utilizado nos ensaios, dentro de uma faixa adequada. Embora a relação entre umidade e constante dielétrica se apresente diretamente proporcional, a mesma não ocorre linearmente. Por esta razão se utiliza uma equação polinomial de terceira ordem para correlacionar os dados. Utilizando minério tipo sinter feed, realizou-se a calibração do sensor de umidade para as umidades 0%, 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Como resultado, obtém-se a curva apresentada na Figura 3.16.



**Figura 3.16 - Curva de calibração.**



Como esperado, observa-se comportamento crescente, porém, não linear da constante dielétrica em função da umidade. A curva de ajuste, gerada pela equação de terceira ordem apresenta bom coeficiente de correlação  $r^2 = 0,9978$ .

### 3.2.2 Controladores

#### 3.2.2.1 Inversor de frequência

Para controle de rotação do motor de indução trifásica com fechamento em 220V, utiliza-se inversor que frequência compatível com as características do motor resumidas na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5 - Características técnicas do motor do ventilador.**

Fabricante	WEG-W22 Premium
Potência	3kW (4CV)
Corrente (60Hz)	10,8A
Tensão	220V trifásica

O inversor de frequência deve ser compatível com a potência, tensão e corrente nominal do motor de indução trifásica. Portanto, o inversor selecionado é o modelo WEG CFW500, com as características técnicas resumidas na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 - Características técnicas do inversor de frequência.**

Fabricante	WEG-CFW 500
Potência	3,7kW (5CV)
Corrente (60Hz)	16A
Tensão	220V trifásica

#### 3.2.2.2 Atuadores

Os elementos atuadores compreendem dispositivos eletromecânicos que atuam em função de uma variável manipulada para que a variável de processo seja controlada.

Para as resistências elétrica, dimensionou-se uma chave estática tripolar de 40A com base no seguinte equacionamento:

Considerando as resistências com  $54\Omega$  cada e a tensão do circuito de 220V, utilizando-se a combinação da Lei de Ohm (Equação 3.16) com a fórmula da potência elétrica (Equação 3.17), calcula-se a potência de 896W a partir da (Equação 3.18):

$$U = R.I \quad (3.16)$$

$$P = U.I \quad (3.17)$$

$$P = \frac{U^2}{I} \quad (3.18)$$

A potência total de 16 resistências elétricas é de 16kW. Inserindo a potência total na equação 3.16 e novamente considerando tensão de 220V, obtém-se a corrente de linha de 73,3A. No entanto, como as fases encontram-se defasadas em  $120^\circ$ , calcula-se a corrente de fase dividindo a corrente de linha por  $\sqrt{3}$ , obtendo-se a corrente de 42,3A. A Figura 3.17 mostra conjunto chave estática tripolar e dissipador de calor. O dispositivo é acionado por tensão de corrente contínua de 24V fornecida por uma saída digital de um controlador.



**Figura 3.17 - Chave estática tripolar + dissipador de calor.**  
Fonte: Comtemp.

Para ligar ou desligar componentes como inversor de frequência, ar-condicionado e umidificador, utilizam-se relés de interface dimensionados para tensão contínua de 24V e alternada de 110V/220V, dimensionados com base nas correntes

e tensões adequadas de cada circuito seguido procedimento semelhante ao adotado anteriormente.

### 3.2.2.3 Controlador Lógico Programável

Como cérebro do gerenciamento e controle, o CLP deve atender a todas as entradas analógicas dos sensores e as saídas dos atuadores. Por esta razão realizou-se o levantamento das exigências do projeto e resumiu-se na Tabela 3.7.

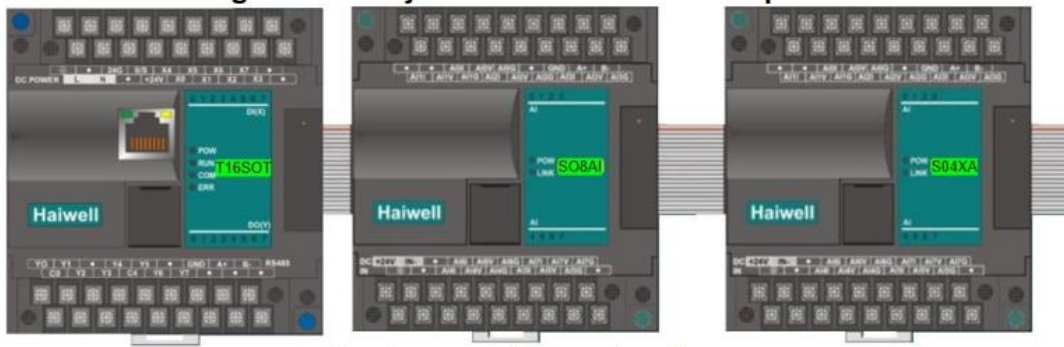
**Tabela 3.7 - Levantamento das entradas e saídas exigidas no projeto.**

<b>Dispositivo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Entrada analógica</b>	<b>Saída analógica</b>	<b>Entrada digital</b>	<b>Saída digital</b>
Inversor de frequência	1 unidade	0	1	1	1
Resistências elétricas	1 unidade	0	0	0	1
Ar-condicionado	1 unidade	0	1	1	1
Umidificador	1 Unidade	0	0	0	1
Sensores	9 unidades	9	0	0	0
Acionamento de relés	5 unidades	0	0	5	0
<b>Total</b>	<b>18 unidades</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>4</b>

Selecionou-se, um conjunto formado por:

1. Um módulo CLP modelo Haiwell T16SOT, composto por 8 entradas e 8 saídas ambas digitais;
2. Um módulo de expansão SINOVOs08AI que dispõe de 8 entradas analógicas, e;
3. Um módulo de expansão analógica SINOVO S04XA contendo duas entradas e duas saídas ambas analógicas.

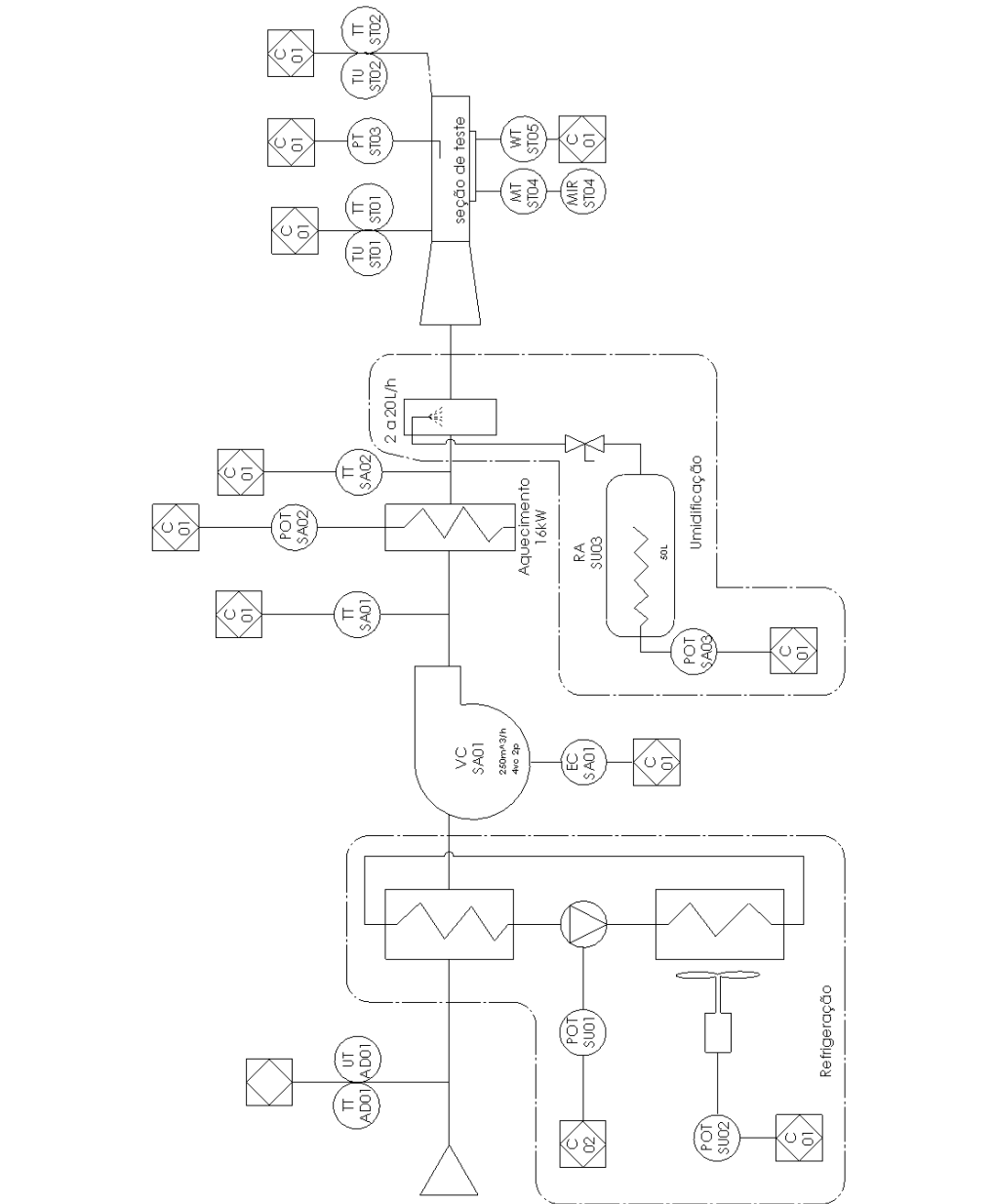
O conjunto é ilustrado pela Figura 3.18, abaixo:



**Figura 3.18 - Conjunto CLP + módulos de expansão.**  
**Fonte: autoria própria.**

### 3.2.3 Diagrama de instrumentação e controle

Todos os sensores, atuadores e controladores dimensionados e descritos anteriormente encontram-se interligados entre si através de uma malha de controle em que os sensores enviam sinais analógicos para o controlador que, através de um algoritmo implementado, executa funções que geram saídas para os atuadores. A Figura 3.19 apresenta o diagrama de instrumentação que compõe o sistema de supervisão e controle do túnel de secagem.



TT AD01	Transmissor de temperatura na seção de admissão
TU AD01	Transmissor de umidade na seção de admissão
TT SA01	Transmissor de temperatura na entrada da seção de aquecimento
TT SA02	Transmissor de temperatura na saída da seção de aquecimento
TT ST01	Transmissor de temperatura na entrada da seção de testes
TU ST01	Transmissor de umidade na entrada da seção de testes
TT ST02	Transmissor de temperatura na saída da seção de testes
TU ST02	Transmissor de umidade na saída da seção de testes
PT ST	Tubo de pitot na seção de testes
MT ST04	Transmissor de umidade na seção de testes
WT ST05	Célula de carga na seção de testes
PI TF03	Transdutor de pressão diferencial
RA SU03	Reservatório de água
EC SU01	Controlador
VC SA01	Ventilador centrifugo
EC SA01	Inversor de frequência
POT SA02	Controlador de potência
C 01	Controlador Lógico Programável
POT SA03	Controlador de potência

Figura 3.19 -Diagrama de instrumentação do túnel de secagem.

A visão geral dada pela Figura 3.18 permite visualizar todos os equipamentos e instrumentos utilizados. Observa-se que todos estão interligados ao controlador identificado por C01. A seção de testes conta com dois sensores de temperatura e umidade relativa, um sensor de pressão diferencial para medição da velocidade, sistema de pesagem e medição de umidade do material. Para futuras medições de eficiência, são instalados sensores de temperatura antes e depois da seção de aquecimento. Um sensor de temperatura e umidade relativa também está presente na entrada para verificação das condições ambientais do local.

O controle de potência de refrigeração é feito com base no controle de rotação do compressor por inversor de frequência, semelhante ao empregado no ventilador. Para aquecimento utilizam-se chaves estáticas trifásicas acionadas pelo controlador através de uma saída PWM. De forma semelhante, a vazão de umidade é controlada com base na carga aplicada sobre o módulo de umidificação também por PWM.

Com base nas informações recebidas pelos sensores, o algoritmo implementado no controlador decide o que deve ser feito para que o setpoint seja atingido e mantido estável. Para manter as três operações: refrigeração, aquecimento e umidificação funcionando isoladas ou em conjunto, implementou-se uma malha de controle para cada operação.

#### 3.2.4 Lógica de controle

A lógica de controle é resumida pelo diagrama apresentado na Figura 3.20. Após definição das condições atmosféricas de velocidade, temperatura e umidade relativa, inicia-se o processo de estabilização a partir das malhas de controle. As malhas operam para que as variáveis sejam estabilizadas e a condição ambiental desejada seja atingida. Cada malha de controle tem como saída uma onda quadrada PWM atualizada constantemente. Cada malha opera a partir da comparação entre a variável real e a variável desejada ou *setpoint*. O equilíbrio é atingido quando a variável real se iguala ao setpoint.

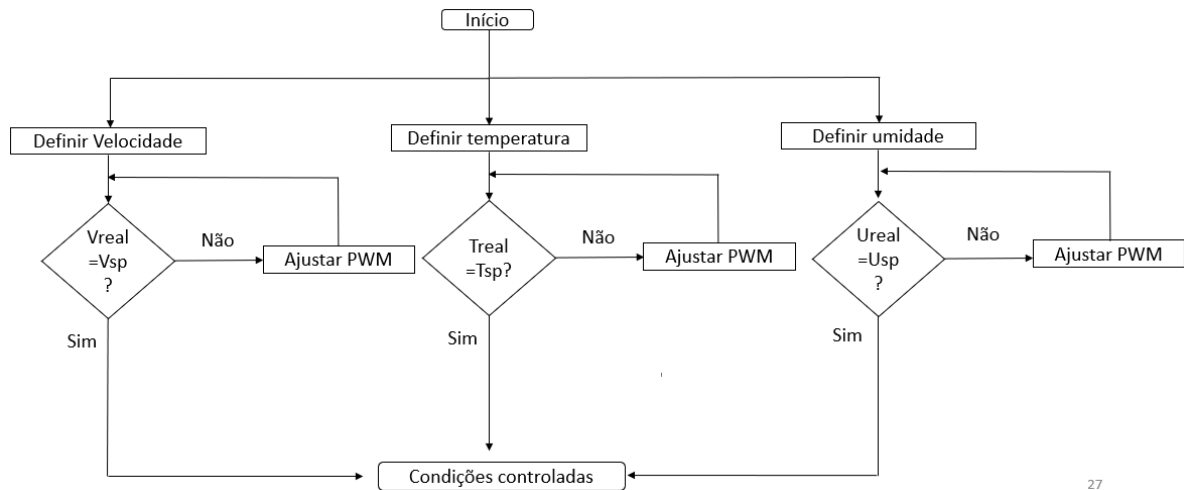


Figura 3.20 - Lógica de controle.

### 3.2.5 Controle de velocidade

A velocidade do ar de secagem é obtida por um inversor de frequência que funciona como elemento atuador, alterando a frequência de alimentação do motoventilador com base em um sinal analógico fornecido por uma saída analógica do controlador. Ou seja, em função de um sinal de 0 a 10VCC transmitido pelo CLP, o inversor de frequência modifica a frequência da rede que alimenta o ventilador, elevando ou reduzindo a velocidade de rotação e assim modificando a velocidade do ar. A Figura 3.21, apresenta um diagrama dos principais componentes do sistema de controle de velocidade. Destaca-se o tubo de Pitot acoplado ao transdutor de pressão diferencial, CLP, inversor e o próprio ventilador.

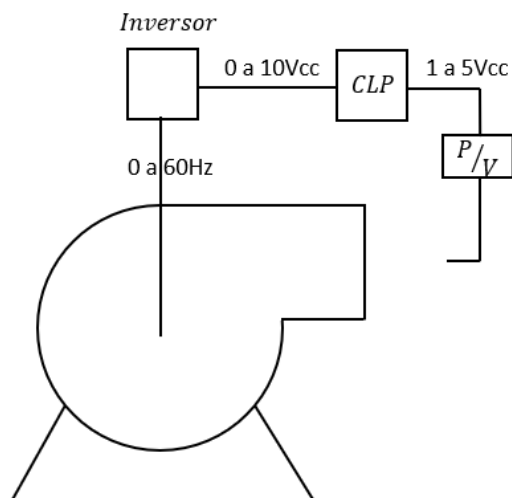
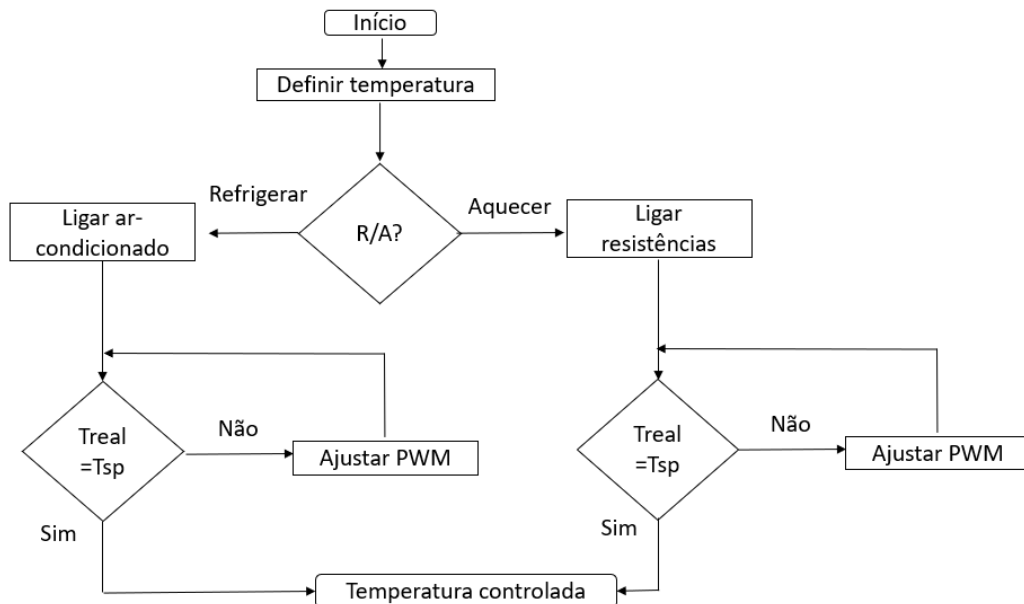


Figura 3.21 -- Componentes da malha de controle da velocidade.

### 3.2.6 Controle de temperatura e umidade relativa

Conforme destacado na revisão sobre psicrometria, observa-se que a temperatura e a umidade relativa estão intimamente relacionadas, uma vez que a temperatura modifica a pressão de vapor, e, portanto, a umidade relativa. Embora a temperatura e umidade relativa sejam variáveis relacionadas, utilizam-se duas malhas para o controle de temperatura e uma malha para o controle de umidade relativa.

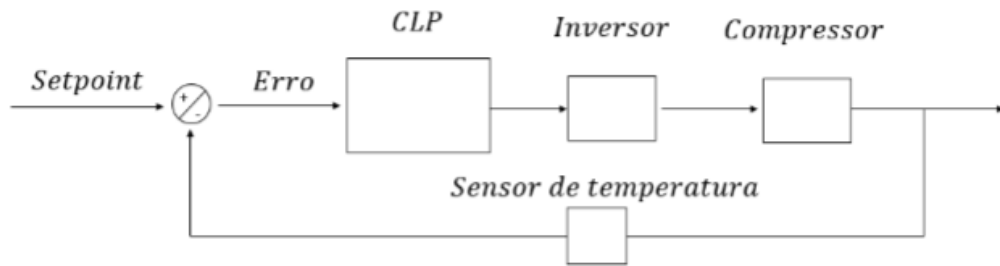
A malha de controle resumida na Figura 3.20 pode ser visualizada em mais detalhes na Figura 3.22. A lógica inicia pela comparação entre a temperatura de *setpoint* e a temperatura atual da seção de testes. Se  $T_{setpoint} > T_{atual}$  então a malha de aquecimento é acionada, e na situação inversa, aciona-se a malha de refrigeração.



**Figura 3.22 - Lógica de controle de temperatura.**

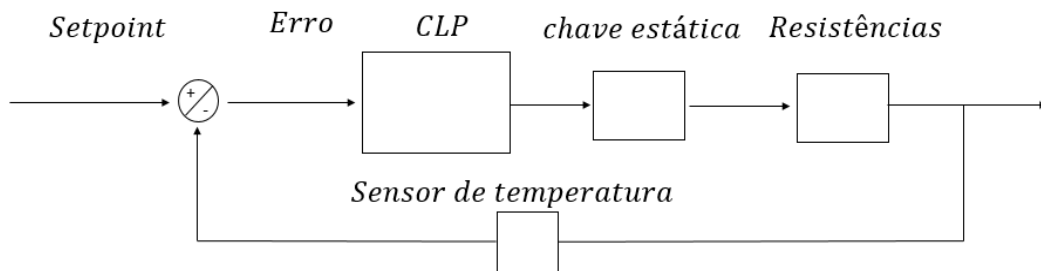
A carga de refrigeração requerida é ajustada pelo compressor de giro variável controlado por um inversor de frequência. O inversor recebe o sinal analógico de 4 a 20mA do CLP e aciona o compressor proporcionalmente. A retroalimentação da malha é realizada por um sensor de temperatura localizado logo após a serpentina do ar-condicionado, conforme representado no diagrama de bloco na Figura 3.23.





**Figura 3.23 - Malha de controle da refrigeração.**

A malha de aquecimento é constituída pelo banco de resistências elétricas acionada por um relé de estado sólido tripolar, ligado a uma saída digital do CLP. O relé é acionado com base em uma onda quadrada PWM, de 24VDC, com largura de banda e período definidas pelo algoritmo PID. A retroalimentação da malha é realizada por um sensor de temperatura posicionado na seção de testes. A Figura 3.24 mostra o diagrama de blocos da malha de controle de temperatura.



**Figura 3.24 - Malha de controle das resistências elétricas.**

A terceira malha corresponde ao acionamento de células ultrassônicas por um relé comandado pelo CLP. O relé é controlado com um sinal PWM determinado pelo terceiro algoritmo PID implementado na programação do CLP, que determina o tempo em que as células permanecem ligadas. Quanto mais tempo as células permanecem ligadas, maior será a névoa de umidade e conseqüentemente maior será a umidade relativa na seção de testes. A Figura 3.23 apresenta a malha de controle da umidade relativa.

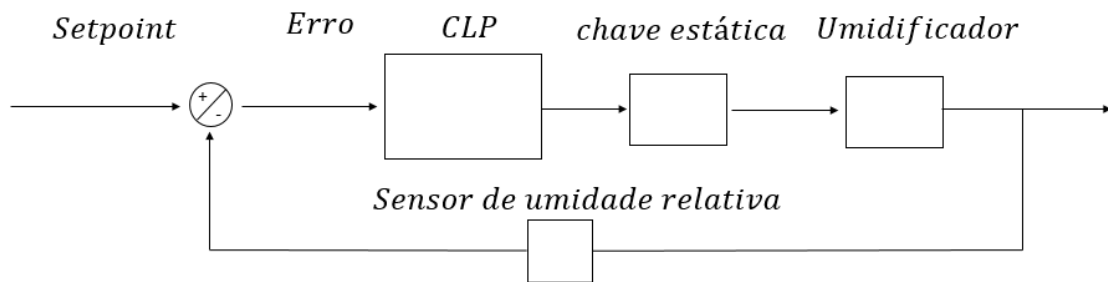


Figura 3.25 - Malha de controle da umidificação.

As três malhas trabalham paralelamente para que os *setpoints* de temperatura e umidade relativa sejam atingidos e mantidos estáveis. O perfil da temperatura e da umidade relativa resultante das três malhas de controle podem ser visualizadas na Figura 3.24. No gráfico (a), observa-se a queda da temperatura durante a refrigeração (região a) e posterior elevação para o *setpoint* através de aquecimento (região b). A combinação dos processos resulta na linha laranja, em que a temperatura converge para o *setpoint*. No gráfico (b), observa-se a variação da umidade relativa, em que a (região 1) compreende a uma pequena queda na umidade relativa durante a refrigeração e queda mais acentuada durante o aquecimento (região 2), atingindo o *setpoint* durante atuação do umidificador (região 3).

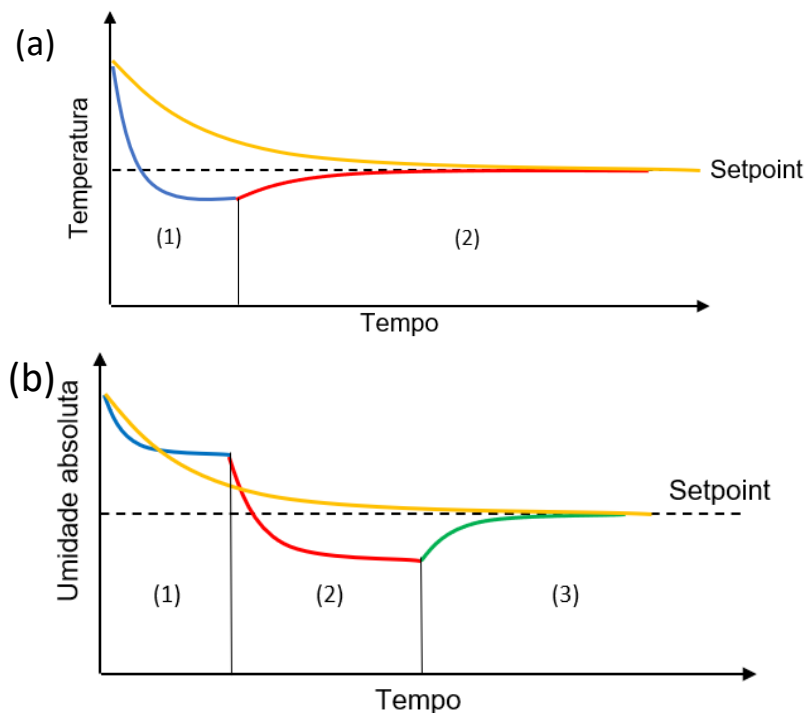


Figura 3.26 - Perfil de temperatura (a) e umidade relativa (b) durante controle.

### 3.3 CONSTRUÇÃO E MONTAGEM

#### 3.3.1 Montagem do túnel de vento

O túnel de secagem foi montado em uma sala com espaço e instalações elétricas apropriadas. Iniciou-se a montagem pelas bases metálicas confeccionadas e adaptadas com materiais pré-existentes, conforme mostrado na Figura 3.25.



Figura 3.27 - Adaptação e pintura das bases metálicas existentes.

Tendo em vista a característica isolante e a facilidade construtiva local, optou-se por fabricar a estrutura do túnel com folhas de madeirite de 12mm de espessura. Para reduzir a rugosidade interna, utilizou-se lona plástica branca como revestimento interno. A Figura 3.26 mostra a montagem da contração junto a seção de estabilização e contração, através dos flanges parafusados. Cada flange encaixada dispõe de tiras de borracha de 5mm para vedação interna.

Fonte: autoria própria.



Figura 3.28 - Contração, seção de estabilização e difusor.

### 3.3.2 Montagem do ventilador

Foi especificado o ventilador OTAM modelo RLS315 OTAM, montado em uma base metálica, fixada por quatro amortecedores, mostrados em vermelho na Figura 3.30. Para evitar a transmissão de vibração do ventilador para o túnel de vento, utiliza-se uma junta flexível de aço galvanizado e isolamento de lona flexível com dimensões de 70mm x 100mm x 70mm. A junta flexível localiza-se entre a saída do ventilador e a flange de entrada do túnel de vento, conforme destacado em amarelo na Figura 3.27.



**Figura 3.29 - Instalação do ventilador.**

Adotou-se a ligação trifásica 220V para ligação do ventilador e dimensionou-se um cabo pp de três vias de acordo com a NBR 5410. Os cabos foram instalados por dentro de eletrodutos de 1" de diâmetro, fixados na estrutura metálica do túnel, conforme destacado na Figura 3.28.



Figura 3.30 - Posicionamento dos eletrodutos.

### 3.3.2 Montagem das resistências elétricas

Para atender a faixa de temperatura de testes, foi especificado um conjunto de aquecimento formado por 18 resistências elétricas tubulares aletadas com potência total de 16 kW, ligadas com fechamento 220V trifásico, conforme Figura 3.29. A ligação em paralelo dos três conjuntos de resistências elétricas, em função da potência de aquecimento desejada é exemplificada na Figura 3.30 (16kW – 42A), Figura 3.31 (8,0kW – 21A) e Figura 3.32 (5,3kW – 14A). Acionadas com chave de acionamento do banco de resistências elétricas, utilizando-se uma chave contatora tripolar de 40A.

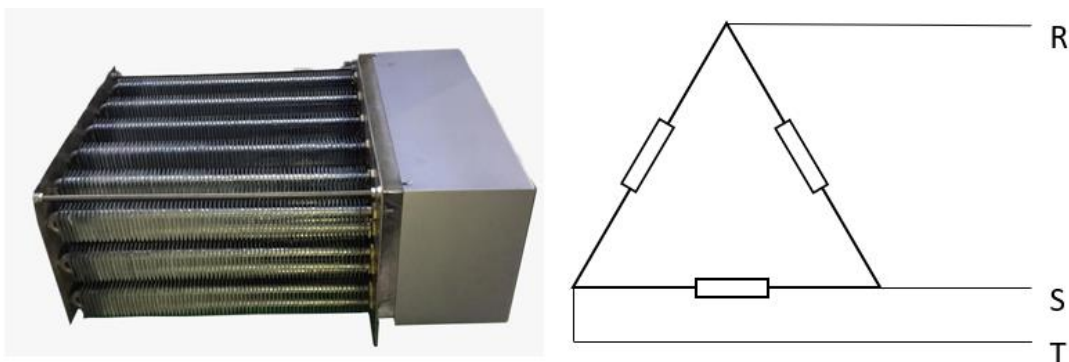


Figura 3.31 - Banco de resistências com fechamento trifásico 220V.

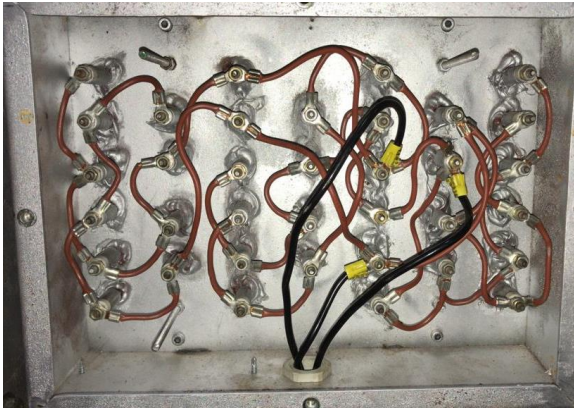


Figura 3.32 - Ligação delta 18 resistências (16kW).

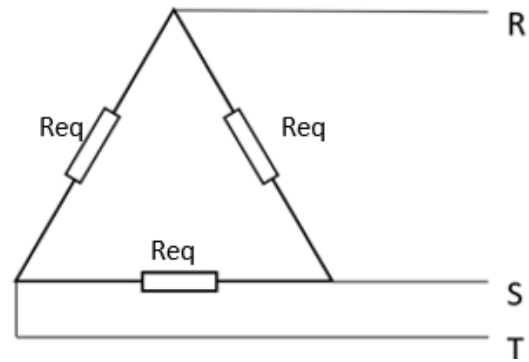


Figura 3.33 - Ligação delta de 9 resistências (8,0kW)

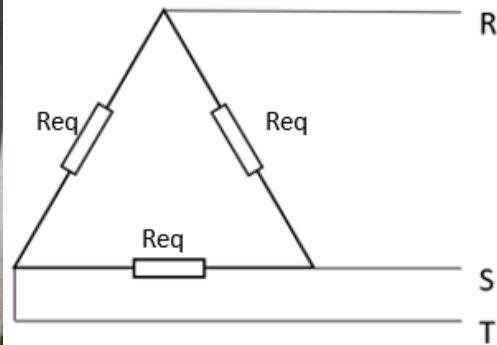
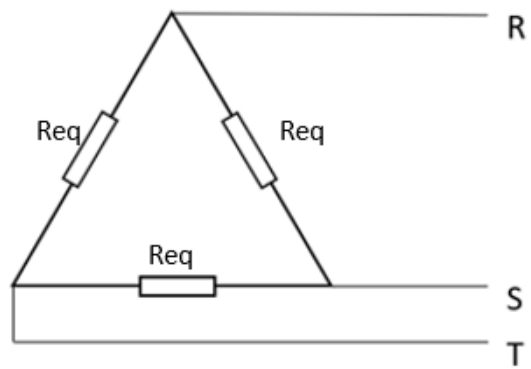


Figura 3.34 - Ligação delta 6 resistências (5,3kW)



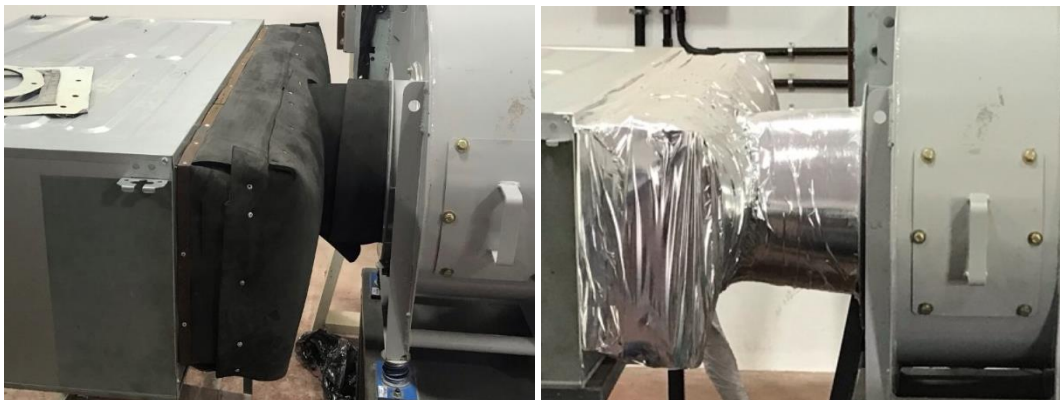
### 3.3.3 Montagem do ar-condicionado

Foi especificado um sistema de refrigeração de 16 kW ou 54 kBTU/h. A seleção do equipamento levou em consideração a potência e aspectos dimensionais, focando em um equipamento de simples instalação no circuito da bancada. Portanto,

selecionou-se o modelo split duto, conforme mostrado na Figura 3.34. A unidade evaporadora foi instalada no início do circuito, na sucção do ventilador. A ligação entre ambos foi realizada com uma redução feita em borracha de 10 mm recoberta com filme de alumínio para isolamento térmico. A instalação das borrachas e do material isolante podem ser visualizados na Figura 3.34. A unidade condensadora foi instalada fora da sala conforme mostrado na Figura 3.35.



**Figura 3.35 - Unidade evaporadora da split duto.**



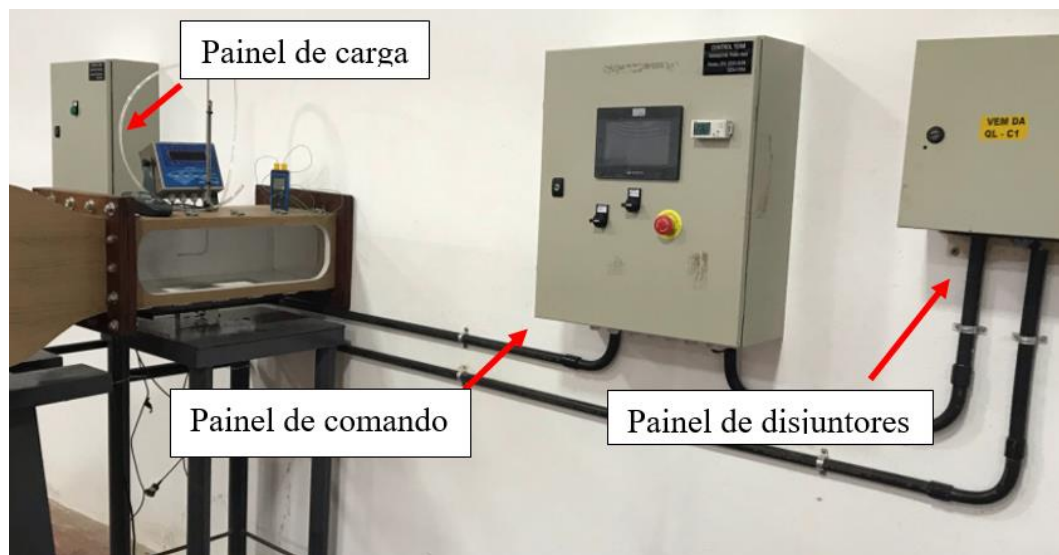
**Figura 3.36 - Acoplamento entre ar-condicionado e ventilador.**



**Figura 3.37 - Unidade condensadora.**

### 3.2.4 Painel de comando, carga e proteção

A instrumentação, controladores e dispositivos de proteção foram distribuídos em três painéis instalados próximo ao túnel de secagem, conforme mostrado na Figura 3.36.

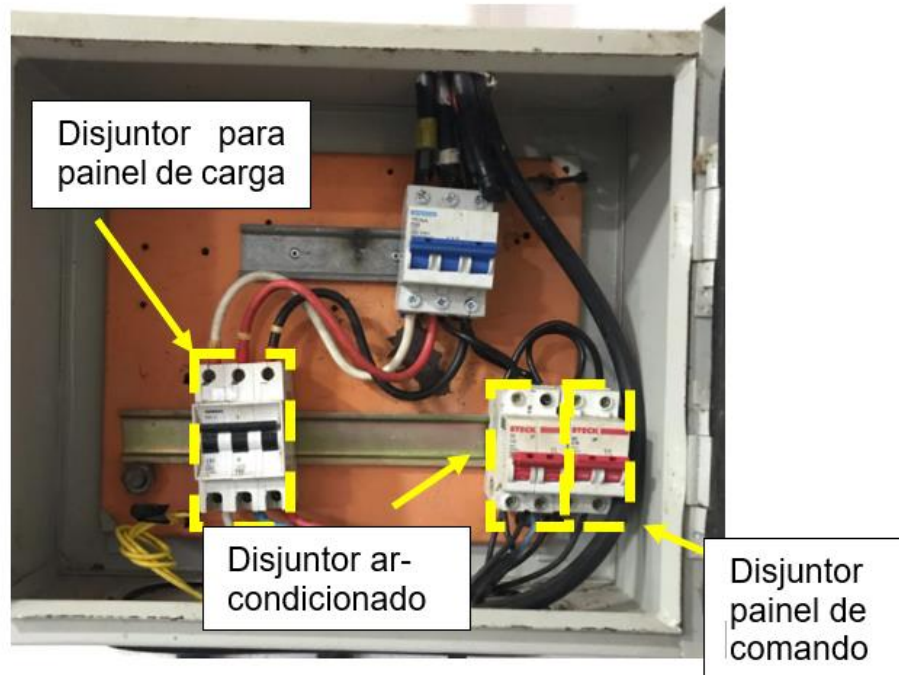


**Figura 3.38 - Posicionamento dos painéis.**

O painel de carga contém um disjuntor geral de 63A, seguido de um disjuntor trifásico de 63A para o painel de carga e dois disjuntores bifásicos de 40A e 20A para o ar-condicionado e o painel de comando, respectivamente. Observa-se na Figura 3.37 que são utilizados apenas três dos cinco cabos que chegam até o painel. Os



demais cabos não utilizados constituem o neutro e o aterramento. Sugere-se substituir o painel para que haja espaço disponível para instalação de um barramento de terra e de neutro. O barramento de terra deve ser dado como prioridade, uma vez que pode reduzir os efeitos da interferência no sensor de umidade.



**Figura 3.39 - Painel de carga**

O segundo painel contém o inversor de frequência para o ventilador e a chave contatora para as resistências elétricas, conforme mostrado na Figura 3.38. O terceiro painel contém o CLP e relés de interface utilizados para acionar cargas tais como ar-condicionado, inversor de frequência e futuramente o sistema de umidificação, conforme mostrado na Figura 3.39.

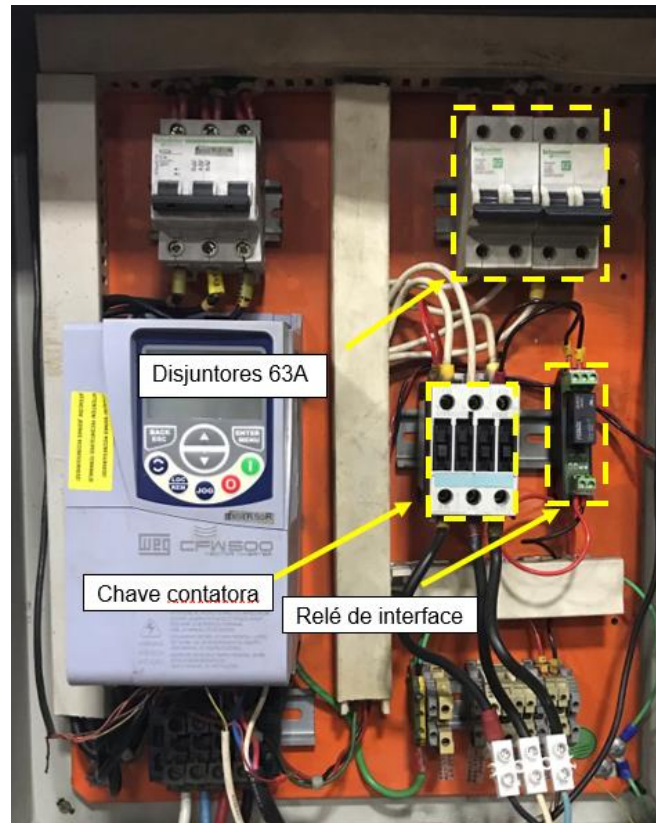


Figura 3.40 - Painel de carga

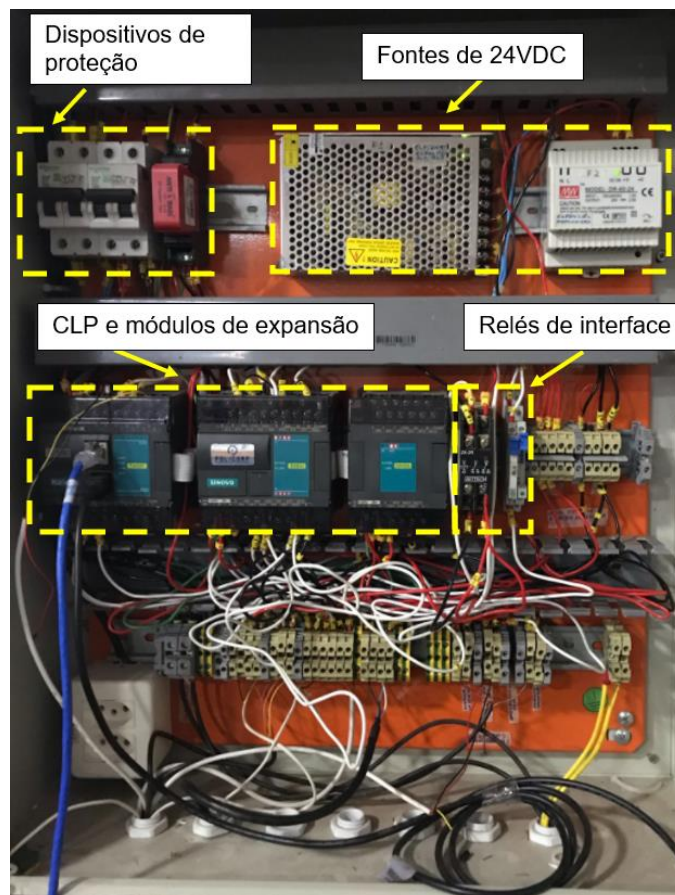


Figura 3.41 - Painel de controle

Por fim, montaram-se painéis de carga, comando e disjuntores (Figura 3.25), cabos de alimentação, eletrodutos e proteções elétricas.

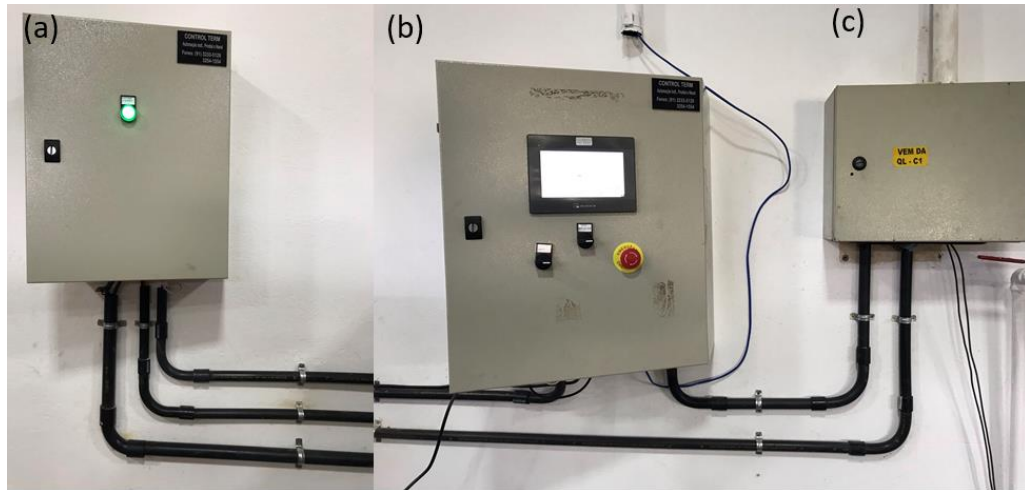


Figura 3.42 - Painel de carga (a), controle (b) e disjuntores (c).

A Figura 3.41 mostra uma visão geral do túnel de secagem montado em frente a uma parede, a qual dispõe de uma janela com dimensões equivalentes para passagem do ar de secagem. Os painéis carga, comando e disjuntores estão presentes na mesma parede interligados por cabos dispostos em eletrodutos. Ao lado do túnel encontra-se o computador para gerenciamento de controle da bancada, que também pode ser feita de forma autônoma pela interface homem máquina (IHM) presente no painel de comando.



Figura 3.43 - Túnel de secagem dimensionado e montado.

## 4. RESULTADOS

O resultado será dividido em quatro tópicos, partindo da análise dos resultados de curvas de secagem e caracterização física de sinter feed. O segundo tópico apresenta o procedimento de calibração do controlador de temperatura. O terceiro e quarto tópico abordarão testes realizados no ar-condicionado e sistema de umidificação, respectivamente. O último tópico descreverá a interferência no sensor de umidade ocasionada pelos demais equipamentos do túnel de secagem.

### 4.1 Caracterização física do sinter feed

Assim como as condições climáticas, a granulometria do material também influencia na dinâmica de secagem. O volume de espaços vazios entre as partículas é influenciado pela distribuição granulométrica do material. O volume de espaços vazios influencia no tipo de interação entre água e as partículas, que podem facilitar ou dificultar o transporte de umidade durante secagem. Portanto, conhecer a granulometria do material é de suma importância para se entender a dinâmica da secagem.

Em uma primeira aproximação através de um microscópio óptico, constata-se a presença de grande quantidade de partículas grossas, conforme mostrado na Figura 4.1 em que (a) é uma amostra de pellet feed e (b) consiste em uma amostra de sinter feed.

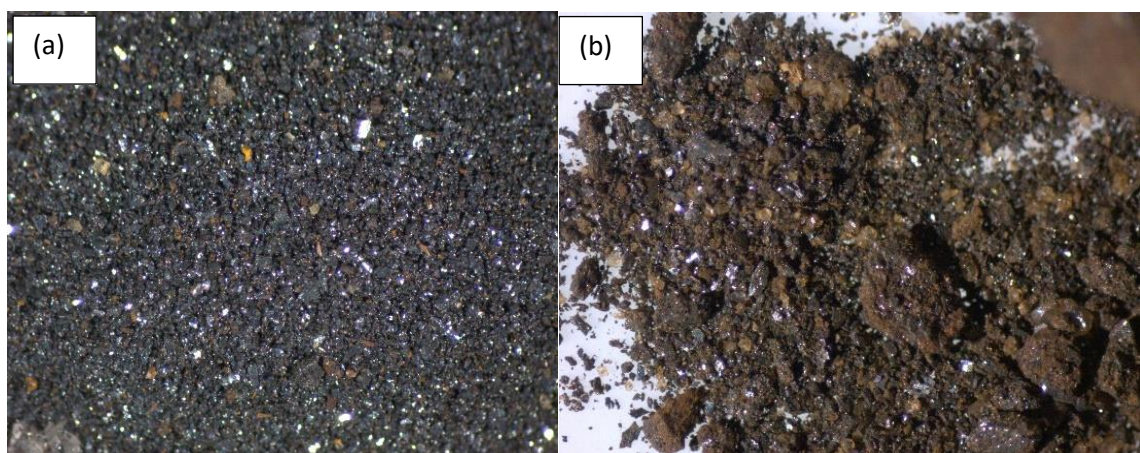


Figura 4.1 - Foto ampliada pellet feed e sinter feed.

A partir de ensaios de granulometria conforme (ABNT, 2016), obtém-se a distribuição granulométrica em função do percentual de partículas passantes por

peneiras com diferentes aberturas de malha. Observando as curvas mostrada na Figura 4.2, observa-se que pellet feed possui maior quantidade de finos, principalmente os finos passantes de  $53\mu\text{m}$ , que representam 31,27% de partículas no pellet feed e de apenas 1,61% no sínter feed. Partículas acima de  $850\mu\text{m}$  não são observadas no pellet feed, no entanto, o sínter feed apresenta partículas na ordem de  $9.520\mu\text{m}$ . Partículas entre  $850\mu\text{m}$  a  $9.520\mu\text{m}$  representam 42,84% de partículas do sínter feed, reforçando sua granulometria mais grossa. Os dados deste procedimento podem ser visualizados com mais detalhes no apêndice B ao final deste manuscrito.

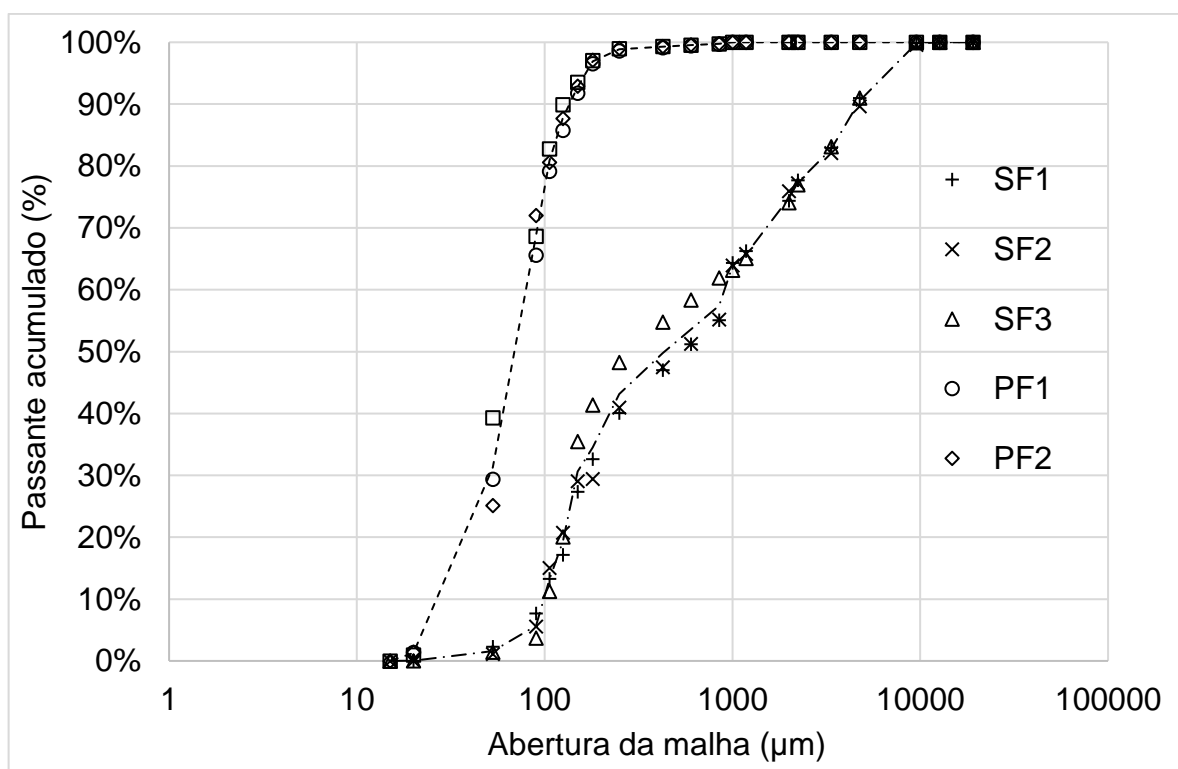
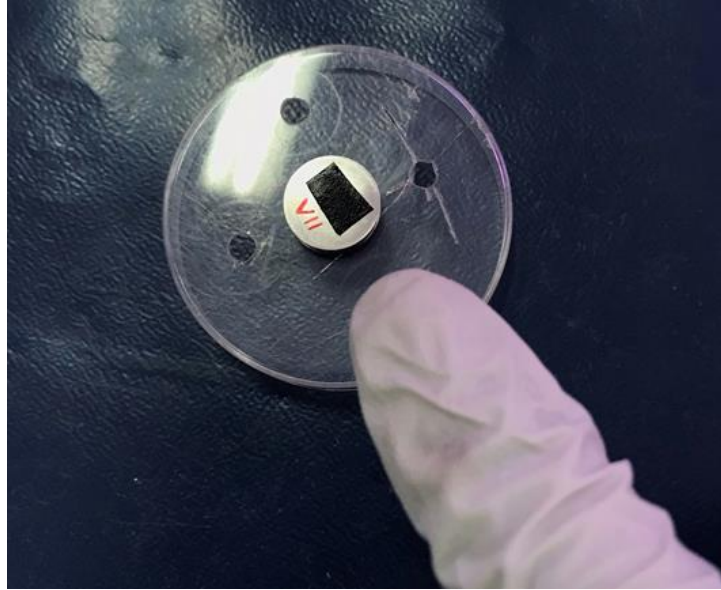


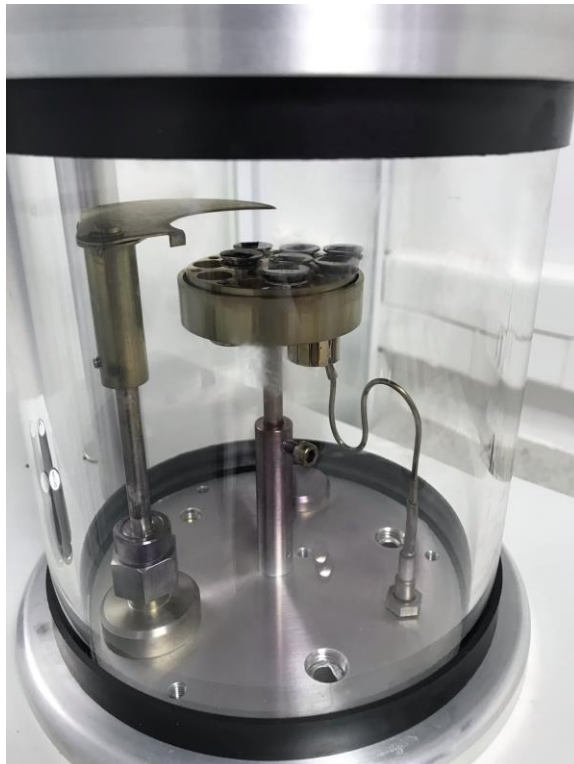
Figura 4.2 - Distribuição granulométrica do sínter feed e pellet feed.

Para avaliação do particulado fino, abaixo de  $20\mu\text{m}$ , analisou-se amostras de ambos os materiais em um microscópio óptico de varredura. Pequenas amostras foram secadas em uma estufa por 24 a  $105^{\circ}\text{C}$  conforme recomenda (ABNT, 2012). Em seguida, uma fina camada é aplicada sobre um pedaço de fita de carbono colada sobre pequenos suportes conforme mostra a Figura 4.3.



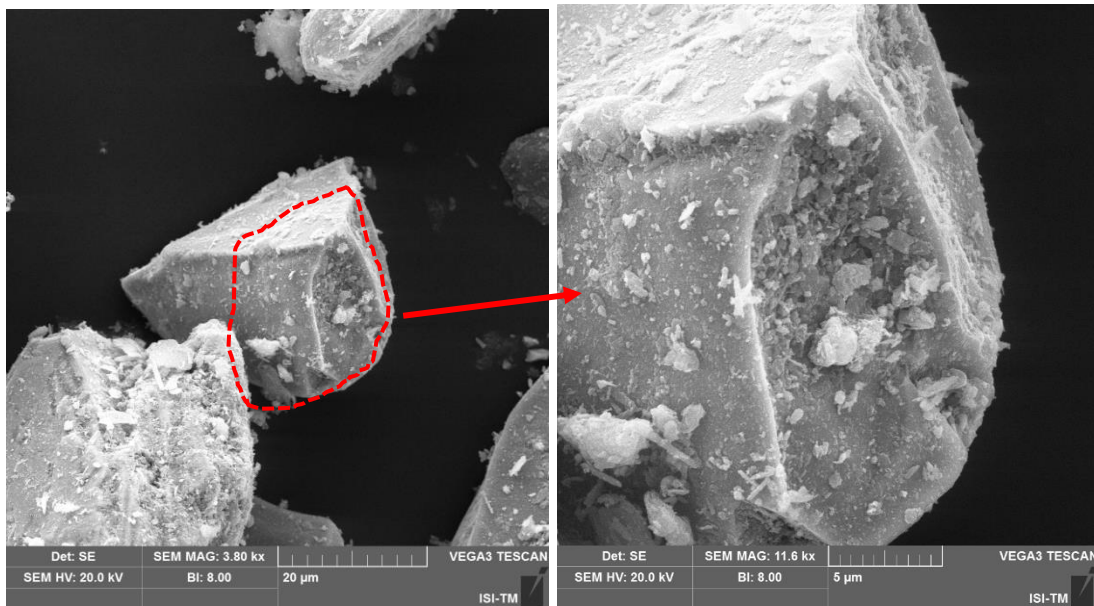
**Figura 4.3 - Strub para análise de amostras em MEV.**

Segundo (SANTOS, 2001), amostras não condutoras devem ser recobertas com uma fina camada de material condutor para evitar acúmulo de cargas negativas originárias do feixe de elétrons. Neste caso, as amostras são levadas a um equipamento que recobre as amostras com uma fina camada de ouro. O processo de recobrimento pode ser visualizado na Figura 4.4.



**Figura 4.4 - Banho de ouro sobre as amostras de minérios.**

Após recobrimento adequado, as amostras são posicionadas no microscópio e obtém-se as microfotografias mostradas na Figura 4.5.



**Figura 4.5 - Agregado de partículas de 2,5µm em partícula de 20µm de sínter feed.**

Ambas as Figuras mostram agregados de partículas irregulares de cerca de 2,5µm presas na superfície das partículas de 20µm, embora a Figura 4.6 tenha revelado maior quantidade de partículas presas a superfície.

A densidade é determinada através do picnômetro, seguindo os procedimentos da (ABNT, 2011). Conforme indicado na Tabela 4.1, a densidade real dada pela média de três medições de sínter feed é de 3,99 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 4.1 - Massa específica pellet e sínter feed.**

Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média (g/cm <sup>3</sup> )
3,89	4,05	4,04	3,99

Determina-se a massa específica aparente através dos procedimentos descritos na (ABNT, 2016). A Figura 4.6 mostra a curva de densidade aparente obtida entre intervalo de 0 e 11% de umidade, que compreende a faixa de umidade utilizada nos ensaios. A massa seca apresenta maior densidade aparente e conforme se adiciona água observa-se decaimento da densidade até um ponto mínimo a partir do qual a densidade aumenta. A densidade aparente do sínter feed apresentou valor mínimo de 7% de umidade.

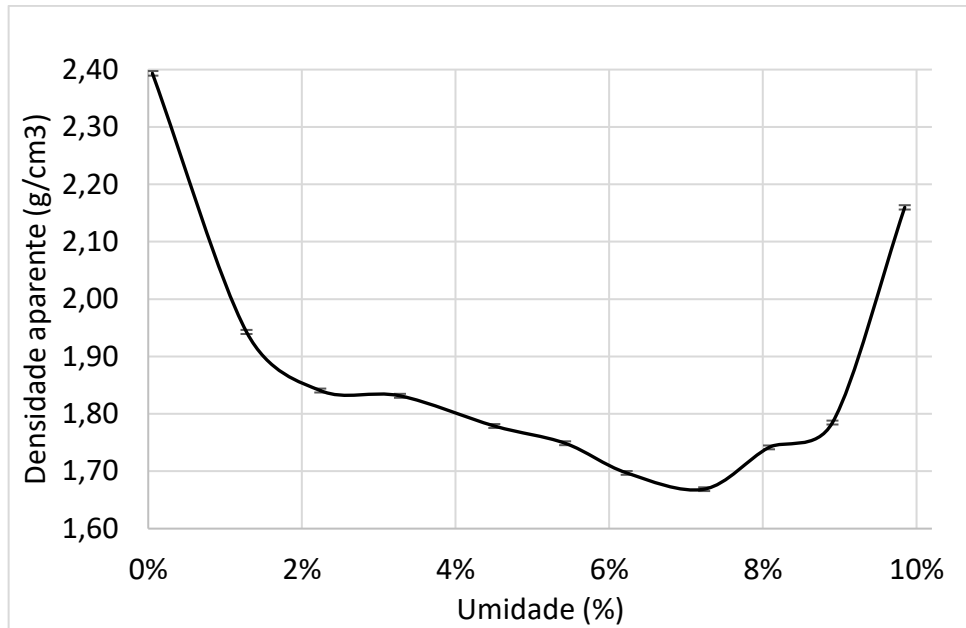


Figura 4.6 - Densidade aparente do pellet feed e sinter feed.

As curvas de densidade aparente fornecem informações relevantes quanto a forma com que a água interage com as partículas do minério que por sua vez influenciam diretamente na cinética de secagem. (GONTIJO, 2017) classifica a água presente em um meio poroso como água capilar e água livre. Sendo a água capilar aquela presente entre a mínima densidade aparente e massa seca e a água livre do ponto de inflexão para as maiores densidades.

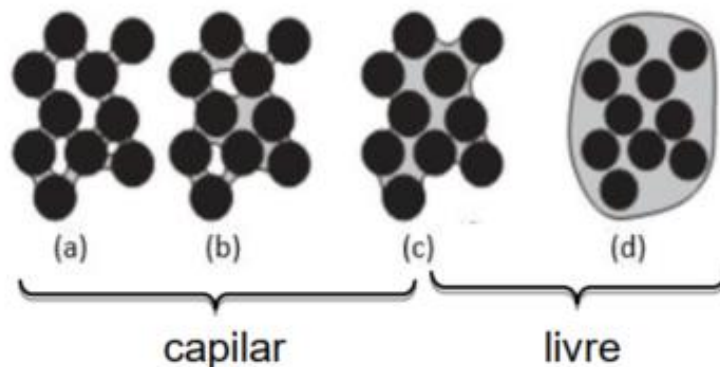


Figura 4.7 - Estados da água sob meio granular.  
Fonte: (GONTIJO, 2017).

Na Figura 4.7 (a) a água encontra-se no estado pendular e as pontes de líquido afastam as partículas, reduzindo a densidade aparente. O estado funicular apresenta-se em (b) a partir do momento que a água começa a preencher os espaços ocupados por ar, resultando no estado de água intersticial (c) em que alguns pontos de saturação



são observados até o momento em que todos os espaços são ocupados pela água ocorrendo a saturação (d).

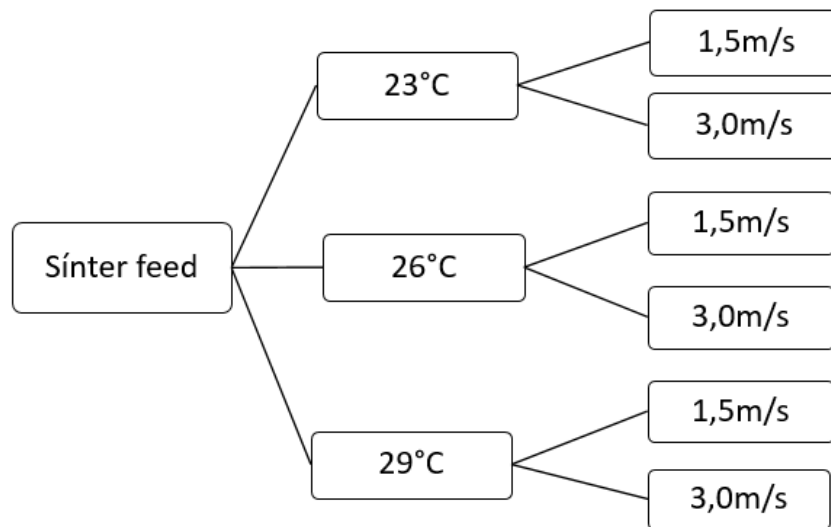
## 4.2 Curvas de secagem

Visando replicar o processo de secagem de minérios sob diferentes condições atmosféricas, adotou-se seis diferentes cenários para o estudo. As temperaturas e velocidades adotadas representam as máximas médias e mínimas condições apresentadas no capítulo 3.1, na Figura 3.1 e Tabela 3.1, respectivamente. As faixas de temperatura e velocidade estão indicadas na Tabela 4.2. O fluxograma apresentado na Figura 4.8 resume as configurações utilizadas.

**Tabela 4.2 - Condições ambientais para ensaios de secagem.**

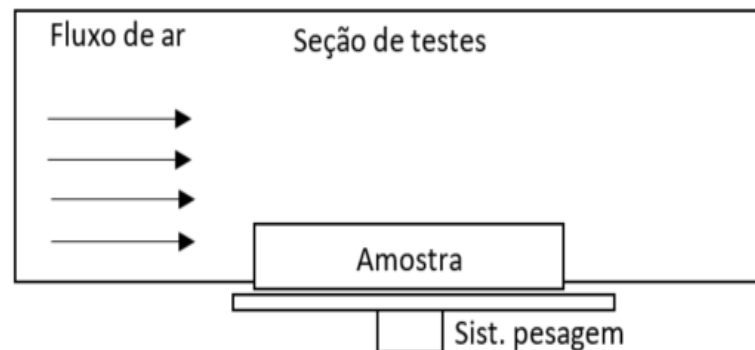
Parâmetro	Máximo	Médio	Mínimo
Temperatura	29°C	26°C	23°C
Velocidade	3,0m/s	-	1,5m/s

O primeiro passo da metodologia consiste em ligar e configurar o túnel nas condições desejadas. Deve-se aguardar cerca de 10 minutos para estabilização das condições climáticas na seção de testes. O segundo passo se inicia com a umidificação de minério seco em 8% de umidade. Amostras são retiradas em cápsulas e colocadas em uma estufa para avaliação da umidade inicial. O sensor de umidade é preenchido até a borda com o minério úmido e uma leve compactação é feita sobre a superfície para que ela seja uniforme. O terceiro passo consiste em posicionar o sensor de umidade sobre a balança após a completa estabilização das condições climáticas na seção de testes. O ensaio é finalizado quando após não haver mais redução na umidade ou na perda de massa após três medições consecutivas.



**Figura 4.8 - Configurações para ensaios com sinter feed.**

O aparato de ensaio consiste em uma balança para medição da perda de massa e por um sensor de umidade para medição da perda de umidade. O sensor de umidade é posicionado dentro da seção de testes e apoiado sobre o prato da balança, conforme ilustra a Figura 4.9 a Figura 4.10.



**Figura 4.9 - Instrumentação da seção de testes.**



**Figura 4.10 - Balança e sensor de umidade.**

Como resultado, são geradas seis curvas de umidade e seis curvas de perda de massa, as quais são apresentadas aos pares nos gráficos presentes na Figura 4.11. As curvas em azul e marcador triangular representam as curvas de secagem geradas a partir dos dados registrados pelo sensor de umidade. Observa-se, em todas as curvas comportamento típico do processo de secagem, a princípio dividido em duas etapas, iniciando por um período de secagem à taxa constante, seguido por um período de taxa decrescente até atingir a umidade de equilíbrio.

Para a velocidade de 1,5m/s, o tempo de secagem foi reduzido em cerca de 28% com o aumento da temperatura de 23°C para 26°C (Figura 60(a) (b)) e cerca de 15% com aumento da temperatura de 26°C para 29°C (Figura (b) c)). Para 3m/s houve redução do tempo de secagem em 40%, de 75h em 23°C para 45h em 26°C (Figura (d) (e)). De 26°C para 29°C houve redução de 12,5% no tempo (Figura (d) (f)). A diminuição do tempo de secagem se deve ao aumento da evaporação da umidade transportada para a superfície de secagem, que potencializa o mecanismo de condução com o ar de secagem.

O aumento da velocidade, como esperado, reduziu o tempo de secagem em todos os ensaios. Em 23°C, o tempo foi reduzido em 16% (Figura (a) (d)), em 26°C houve diminuição do tempo de secagem de cerca de 30% (Figura (b) (e)) e para a velocidade de 29°C o tempo foi reduzido em 27% (Figura (c) (f)). O encurtamento do tempo se deve a potencialização do mecanismo de convecção ocorrida entre a superfície úmida e o ar de secagem.

Os efeitos da temperatura e da velocidade sobre a taxa de secagem, e consequentemente o tempo de secagem, podem ser visualizadas na Figura 4.12. Como esperado, maiores temperaturas e velocidades acarretam maiores taxas de secagem. A máxima taxa alcançada foi de  $1,25\text{ g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$  pela curva de 3,0m/s e 29°C. Esta configuração apresentou um pequeno período de aumento da taxa de secagem, seguido por um longo período à taxa decrescente. A curva de 3,0m/s/26°C apresentou máxima taxas de  $0,935\text{ g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$  e curva semelhante a anterior. No entanto, a curva de 3,0ms/23°C apresentou maior tempo para se atingir a máxima taxa de secagem de  $0,61\text{ g}/\text{min}\cdot\text{m}^2$  que ocorreu em um período de taxa constante. A curva pode ser claramente dividida em três partes, tendo como primeiro período taxa de secagem constante, devido a evaporação da umidade superficial, seguido pela taxa constante, em que a evaporação é compensada pelo transporte de umidade das camadas inferiores. O terceiro período, à taxa decrescente, representa o momento em

que o equilíbrio entre evaporação e transporte de umidade não se mantém. As curvas de 1,5m/s/23°C e 1,5m/s/26° também apresentaram curvas com três períodos distintos, em que as máximas taxas de secagem foram de 0,48 e 0,376g/min.m<sup>2</sup>.

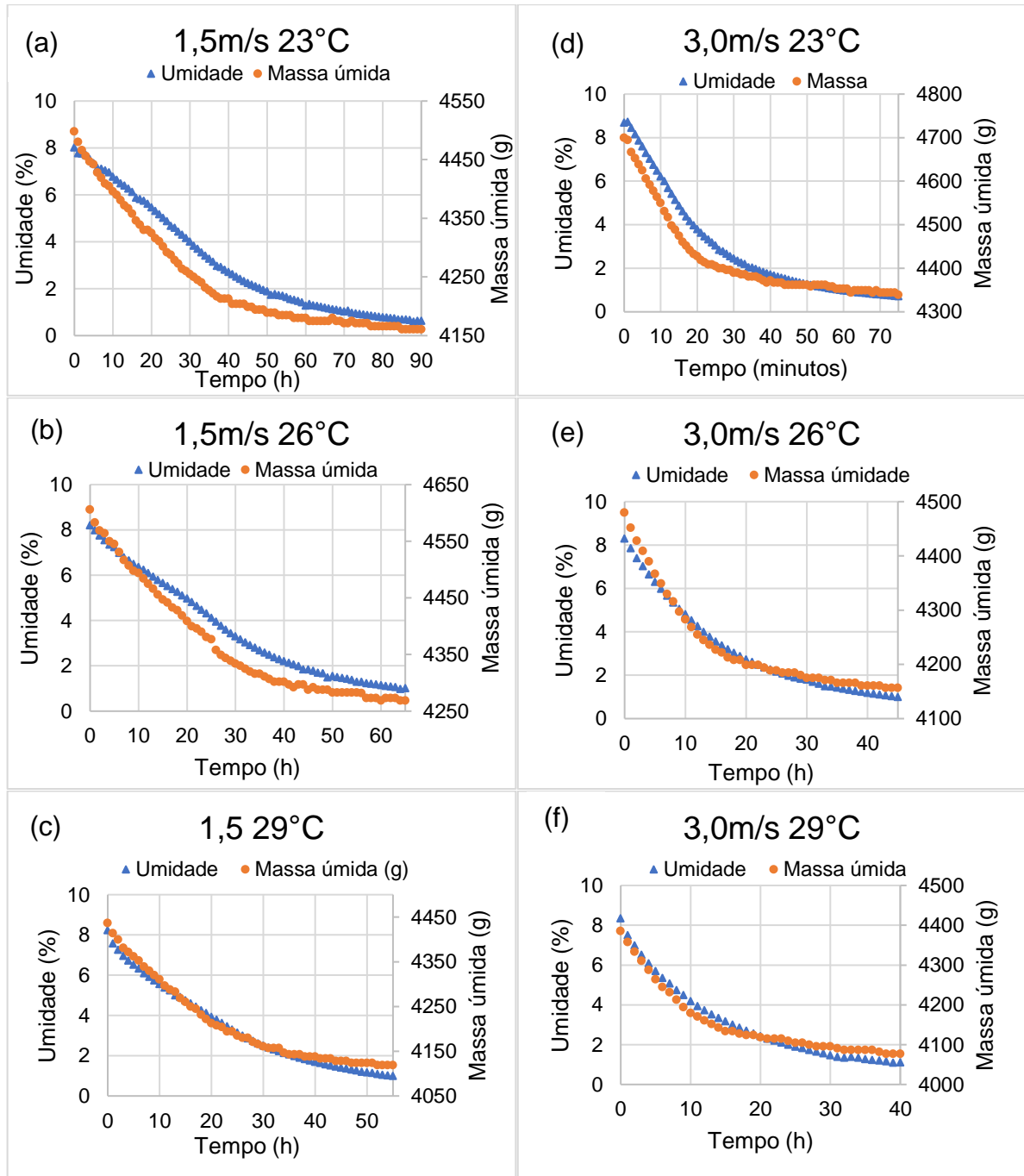


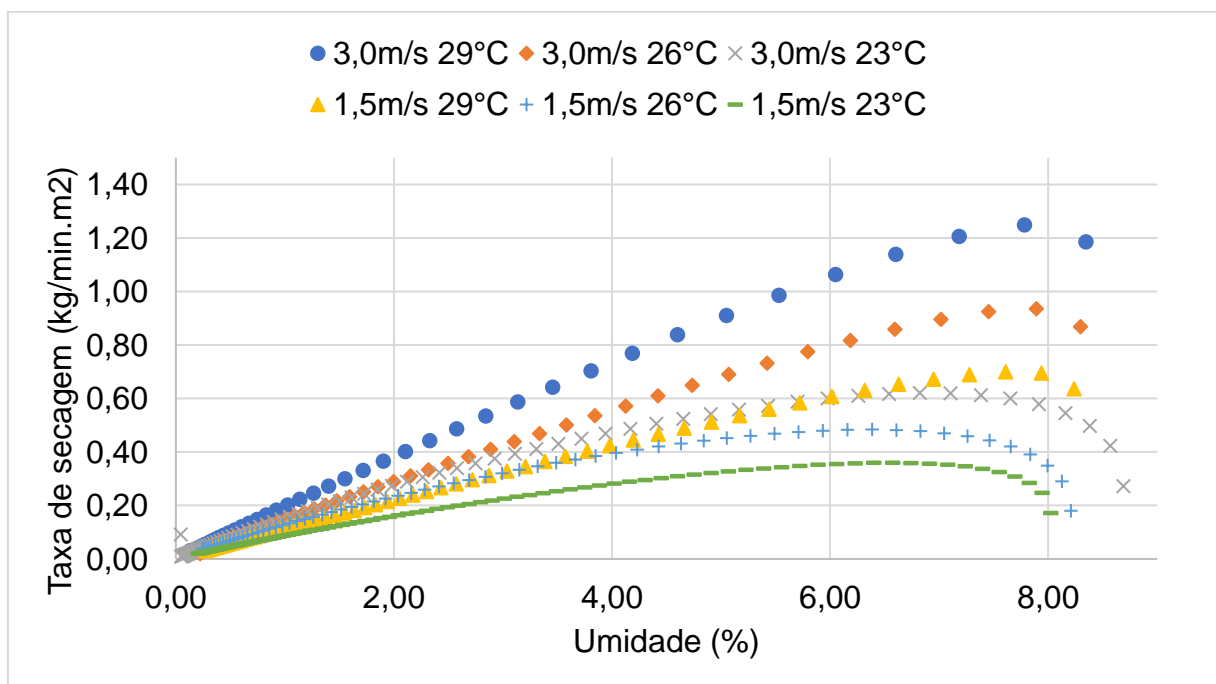
Figura 4.11 - Curvas de massa e umidade

O balanço de massa de todas as curvas é apresentado na Tabela 4.2. Os ensaios iniciaram com umidade média de 8,20% e todos atingiram equilíbrio entre 0,5 e 1,1%. A perda de umidade em todos foi de aproximadamente 7,3%, representando cerca de 340g de massa de água. A diferença entre a massa de água,

dada pela diferença do produto da umidade vezes a massa úmida inicial e final, e a massa medida pela balança, representa a massa de minério seco perdida durante o processo. Observa-se na última linha da tabela 4.2 que não houve perda de massa seca e quando houve, representou apenas 1g. Isso se deve a reduzida força de arrasto eólico sobre as partículas de minério devido a baixas velocidades.

**Tabela 4.2 - Balanço de massa.**

	1,5m/s 23°C	1,5m/s 26°C	1,5m/s 29°C	3,0m/s 23°C	3,0m/s 26°C	3,0m/s 29°C
Umidade inicial	8,02%	8,21%	8,24%	8,10%	8,30%	8,30%
Umidade final	0,57%	0,99%	0,83%	0,71%	1,08%	1,1%
Perda de umidade	7,46%	7,22%	7,41%	7,39%	7,22%	7,22%
Massa de água inicial	361g	378g	366g	380g	372g	372g
Massa de água final	24 g	42g	34g	31g	45g	45g
Perda de massa de água	337g	336g	332g	350g	327g	327g
Massa úmida inicial	4.498g	4.606g	4.437g	4.695g	4.480g	4.386g
Massa úmida final	4.161g	4.269g	4.105g	4.344g	4.152g	4.077g
Perda de massa úmida	337g	337g	332g	350	328g	328g
Perda de massa seca	0g	1g	0g	1g	1g	1g



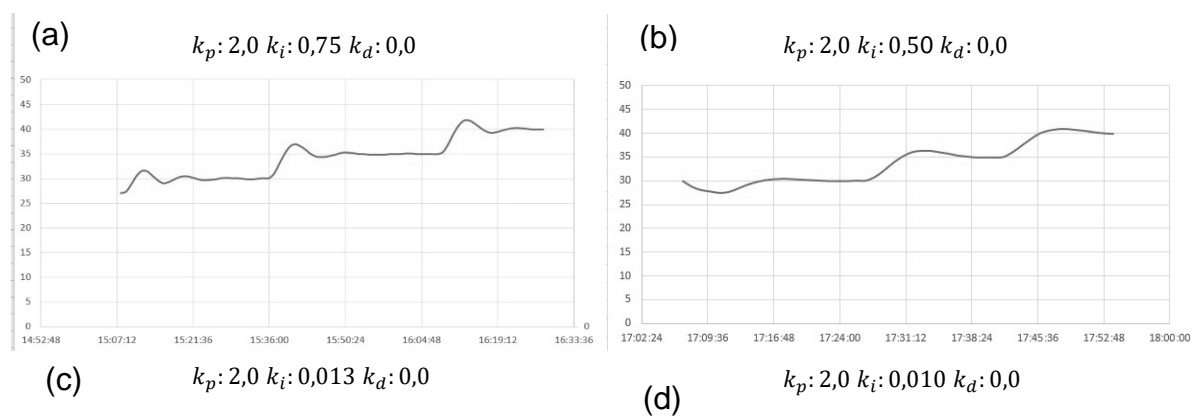
**Figura 4.12 - Taxa de secagem versus umidade.**

Para melhor compreender fenômenos da natureza se faz necessário replicá-los em laboratório sob ambiente controlado. Isto se aplica aos estudos de secagem, visto que é necessário entender a influência das condições atmosféricas sobre a dinâmica de secagem. Isto é atingido através da implementação do sistema de supervisão e controle programado para operar os equipamentos do túnel de forma que se mantenham constantes a temperatura, umidade relativa e a velocidade do ar de secagem.

Embora a proposta do túnel seja manter os três parâmetros acima constante, este trabalho se concentra basicamente no controle de temperatura e indiretamente da umidade relativa. Isto ocorre devido à não completa aquisição dos equipamentos necessários até o momento em que este manuscrito é redigido.

Uma vez que a velocidade é controlada por um inversor que opera sob frequência constante em função da velocidade requerida, desconsidera-se a necessidade de implementar um controlador de malha fechada para a velocidade e concentra-se na avaliação de controle da temperatura. Os procedimentos de calibração descritos a seguir referem-se a malha de controle representada na Figura 3.21 (a).

Embora existam muitos procedimentos de sintonia tal como a técnica de *Ziegler-Nichols* e da curva de reação, o procedimento adotado neste trabalho consistiu em primeiramente entender a dinâmica do processo de aquecimento e então iniciar a calibração pelo controle proporcional, por tentativa e erro. Os gráficos presentes na Figura 4.15 apresenta o comportamento da temperatura em função da modificação da constante integral ( $k_i$ ).



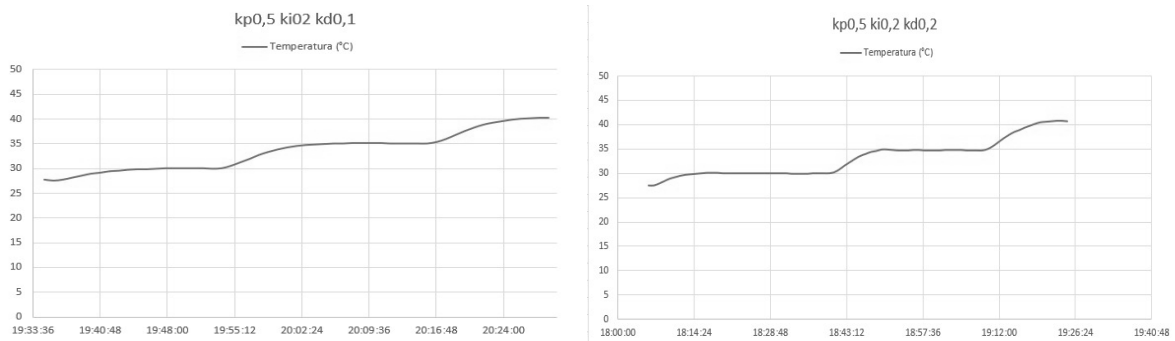


Figura 4.13 - Sintonia PID.

Com elevados valores de  $k_i$  Figura 4.12(a) observa-se um pico de temperatura com amplitude de 2°C acima do setpoint, seguido por um segundo pico de menor amplitude a partir do qual a temperatura se estabiliza ao setpoint adotado. O mesmo comportamento se observa em todos os setpoints (30°C, 35°C e 40°C). Na figura 4.12(b) observa-se pico de menor amplitude e de maior comprimento quando o  $k_i$  é reduzido a 0,5. Melhores resultados foram obtidos com  $k_i$  reduzido a duas casas decimais conforme apresentado nos gráficos (c) e (d). Observa-se em (c) a não ocorrência do pico e mais rápida estabilização ao setpoint quando  $k_i$ : 0,013. O gráfico (d) apresenta comportamento semelhante quando  $k_i$  é reduzido a 0.010, diferenciando-se apenas pelo maior tempo de estabilização. Procedimento semelhante foi realizado alterando-se  $k_p$  e  $k_d$  obtendo-se os valores como  $k_p$ : 2,0  $k_i$ : 0,013 e  $k_d$ : 0,0.

### 4.3 Testes com umidificador

Para a vazão calculada de 20,9 kg/h, podem ser utilizados sistemas de umidificação por vapor ou por água atomizada. Inicialmente foi idealizado um sistema evaporativo, que foi descartado devido à necessidade de uma rede de abastecimento constante de água filtrada, limpeza frequente do tanque e resistências elétricas e dispositivos de segurança confiáveis, a opção tornou-se cara e a mais perigosa das alternativas por envolver elevadas correntes.

Testes de umidificação por atomização foram realizados com um módulo de spray Autojet 155+ da fabricante Spraying Systems, e bico atomizador pneumático modelo 1/4J-SS+SU11SS do mesmo fabricante. O bico foi posicionado 5 cm à frente da serpentina da unidade evaporadora, de forma que as gotas passem paralelas a corrente de ar seco, conforme mostrado na Figura 4.15.



Figura 4.14 - Posicionamento do bocal de umidificação

Embora a vazão da bomba seja suficiente para a vazão requerida calculada (1,57l/min @ 2,76bar), o jato do bico tem alcance amplo, maior que o espaço disponível na saída do ar-condicionado, verificando-se que a maior parte da água injetada se choca com as paredes do ar-condicionado. A parcela injetada de fato na corrente de ar frio não é suficiente para elevar a umidade nos níveis exigidos.

Embora a vazão da bomba atenda ao valor calculado, apenas uma pequena fração da névoa atomizada é carregada pelo fluxo de ar frio, devido ao alcance do jato (Figura 4.15) ser superior ao espaço disponível no ar-condicionado.

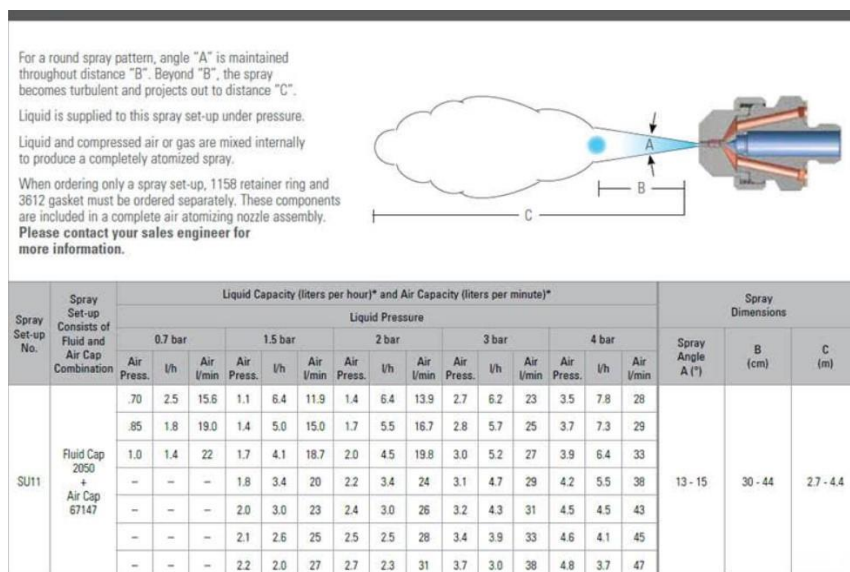


Figura 4.15 - Dados do bocal atomizador



O terceiro método, mais adequado a esta aplicação, consiste na injeção de água atomizada através de células ultrassônicas imersas em um tanque de água. A Figura 4.16 mostra um conjunto de células de umidificação acionadas por tensão contínua que podem facilmente ser empregadas em um tanque de água para umidificação. Um sistema completo, contendo tanque de água, células, conexão para entrada de água e difusores para saída de névoa, pode ser visualizado na Figura 4.17.



**Figura 4.16 - Células ultrassônicas**



**Figura 4.17 - Umidificador ultrassônico.**

O sistema apresentado na Figura 4.17, apresenta fácil interligação com o CLP do túnel, facilitando programação. O sistema foi orçado em R\$ 11.800,00 conforme Anexo A deste relatório. No entanto, equipamentos mais baratos podem ser encontrados em fornecedores nacionais especializados.

Portanto, o sistema de umidificação ultrassônica se apresenta como método mais adequado para utilização no túnel de secagem, dada sua fácil instalação e conexão serial com o sistema de controle e segurança. Uma rede de abastecimento

é necessária para este equipamento, que pode ser facilmente derivada da rede já existente no laboratório, que se encontra próxima ao local do túnel.

#### 4.4 Testes com ar-condicionado

A placa inversora que está presente no ar-condicionado modifica a rotação do compressor em função da carga térmica e mantém o compressor funcionando continuamente, garantindo melhor estabilidade do processo de refrigeração e desumidificação na seção de testes. Entretanto, houve dificuldade para integrar este sistema no CLP do sistema de controle. Inicialmente, tentou-se comunicar a placa inversora com CLP via conexão serial RS234 e R2485. A ligação não foi possível devido aos protocolos de comunicação do fabricante serem proprietários e confidenciais. Para controlar a rotação via CLP, sugere-se a seguinte modificação: Substituir o compressor de corrente contínua do fabricante por um compressor equivalente de corrente alternada de tensão 220V trifásico. A Figura 4.18 mostra os dados do compressor atualmente utilizado no ar-condicionado.

INVERTER ROTARY COMPRESSORS R410A

Model	Power Source [ph/V/Hz]	Cooling Capacity [W] @60rps	COP [W/W]	Displacement [cc/rev]	Weight [Kg]	Outside Diameter / Height [mm]	Accumulator Height / Outside Diameter [mm]	Type	Range [rps]
GA072MFB	1ph 200-240/50-60	2,227	3.25	7.2	7.1	106.0 / 276.7	272.4 / 50.8	Single	15-120
GA102DAA	1ph 200-240/50-60	3,195	3.17	10.2	8.3	106.2 / 266.0	306.6 / 75.0	Single	15-120
GKT141MBA	1ph 200-240/50-60	4,279	3.22	14.1	10.2	118.2 / 317.7	344.2 / 90.0	Twin	15-110
GKT176MAE	1ph 200-240/50-60	5,510	3.34	17.6	12.0	118.2 / 317.2	357.2 / 90.0	Twin	10-100
GJT240MAB	1ph 200-240/50-60	7,414	3.25	24.0	14.5	127.3 / 340.0	383.4 / 75.0	Twin	10-110
GJT325MAA	1ph 200-240/50-60	10,316	3.31	32.5	15.2	378.3 / 290.0	375.6 / 90.0	Twin	10-110
GPT442MBB	1ph 200-240/50-60	13,921	3.28	44.2	20.2	145.4 / 382.9	448.9 / 90.0	Twin	15-100
GPT442MAB	3ph 380-420/50-60	13,921	3.28	44.2	20.2	145.4 / 382.9	448.9 / 90.0	Twin	15-100

**Figura 4.18 - Dados técnicos do compressor GPT442MAB.**

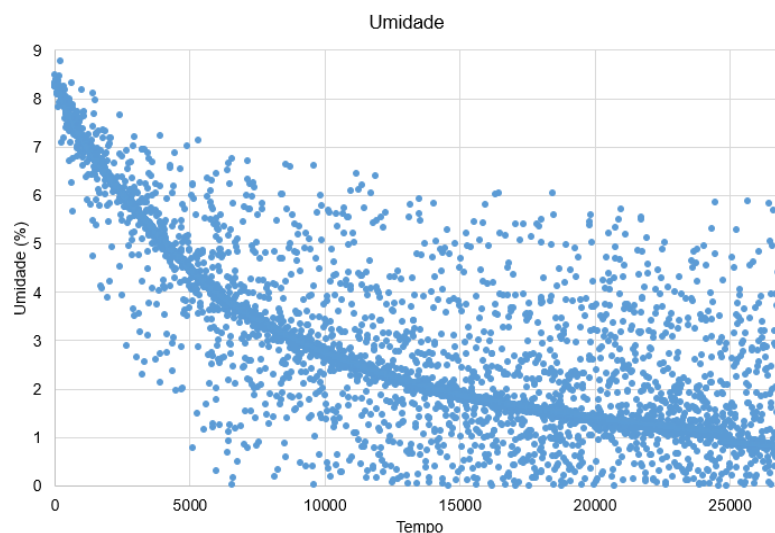
O compressor atual pode ser substituído pelo compressor scroll inverter, modelo 120G0142 220V trifásico fornecido pela Danfoss. O modelo acompanha um inversor de frequência que pode ser comunicado facilmente com o CLP através de uma saída analógica de 4 a 20mA ou 0 a 10VDC. A Figura 4.19 mostra o conjunto compressor e inversor fornecido pela fabricante. As demais informações do compressor podem ser consultadas no site do fabricante e as dimensões podem ser visualizadas no anexo D.



**Figura 4.19 - Compressor inverter Danfoss.**

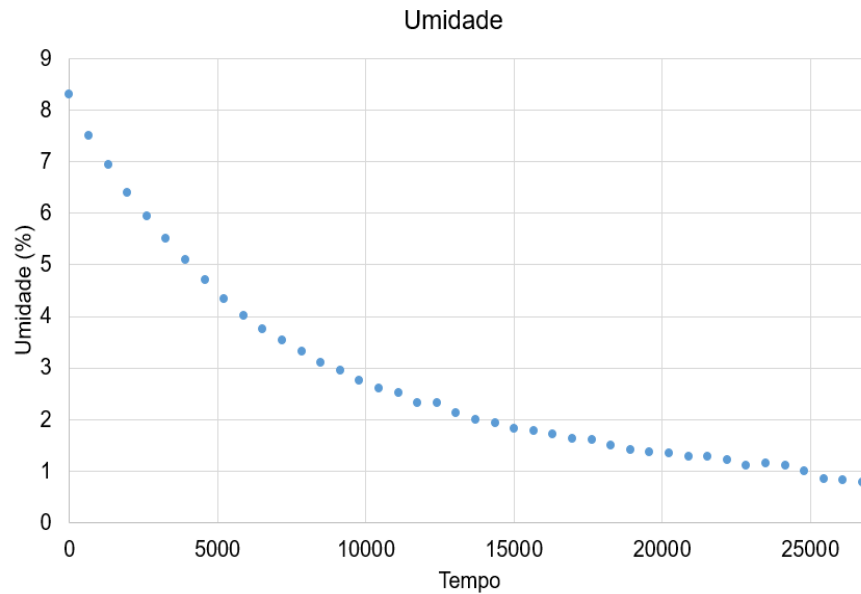
#### 4.5 Interferência no sensor de umidade

Durante os primeiros ensaios foram observados elevados níveis de interferência nos dados medidos e registrados pelo sensor de umidade capacitivo. A Figura 4.20 mostra uma curva de umidade sem utilização de filtros, em que se pode observar elevado nível de interferência, embora a linha de decaimento de umidade seja visível.



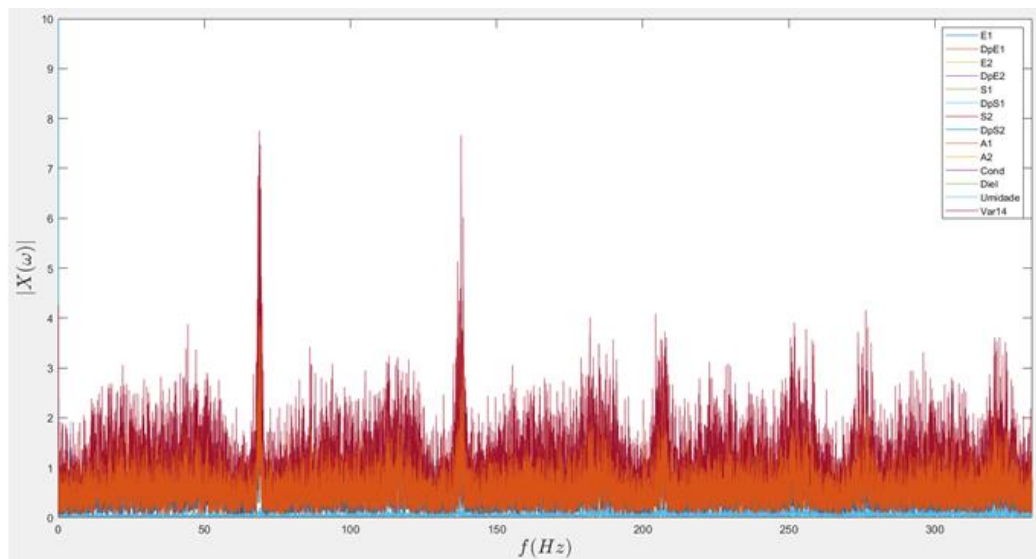
**Figura 4.20 - Ruídos na curva de umidade.**

A Figura 4.21 apresenta a mesma curva, porém com aplicação de um filtro, que consiste basicamente em considerar apenas as medições realizadas a cada 1h. Observa-se completa eliminação das interferências, resultando em um gráfico limpo.

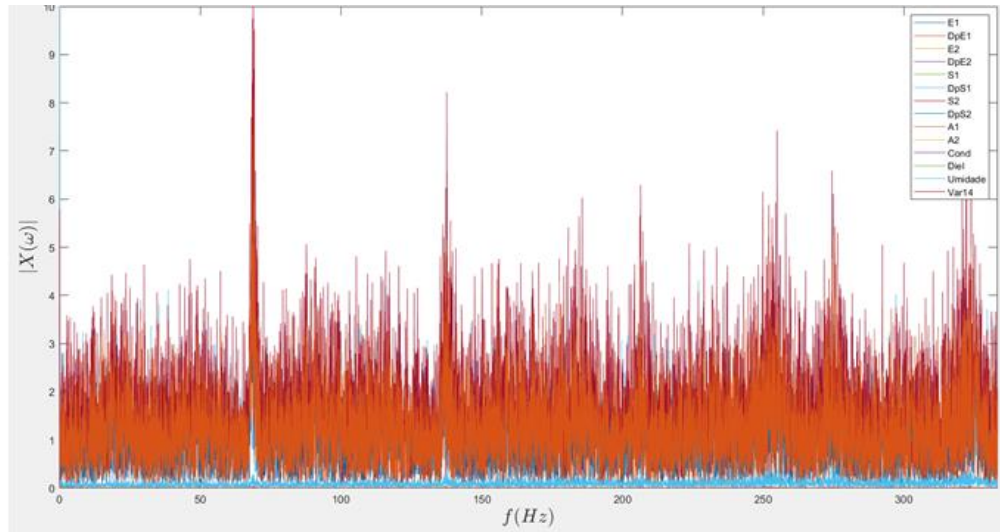


**Figura 4.21 - Curva de umidade com filtro de 1h.**

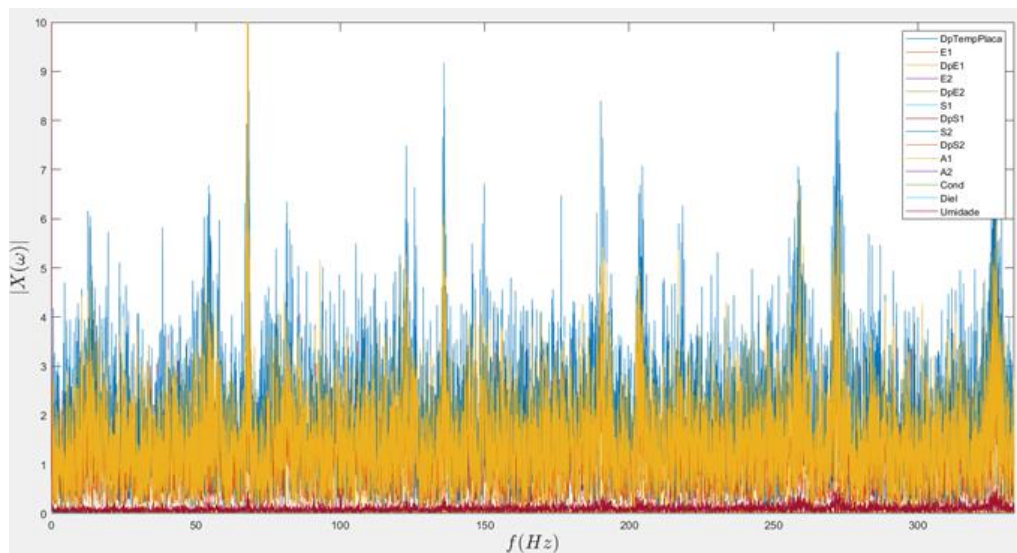
Os dados gerados pelo sensor de umidade são apresentados no domínio da frequência após aplicação da FFT, conforme Figuras 4.22, 4.23 e 4.24. Em todos os gráficos observa-se o pico da harmônica fundamental, correspondente a frequência de 60Hz seguido por harmônicas consecutivas.



**Figura 4.22 – Avaliação de harmônicos 1.**



**Figura 4.23 - Avaliação de harmônicos 2**



**Figura 4.24 - Avaliação de harmônicos 3.**

Os harmônicos podem ser resultado da elevada quantidade de inversores de frequência presentes na rede do laboratório. Para redução do nível de interferência que se apresenta no sensor de umidade, dado seu princípio de funcionamento capacitivo, sugere-se aplicar as seguintes soluções:

- Instalar filtro de ruídos EMI na tomada do sensor de umidade.
- Alojamento do circuito do sensor de umidade dentro de uma caixa metálica e aterrada.
- Remover cabos energizados próximos ao sensor.
- Aterrizar carcaças metálicas das máquinas presentes no laboratório.
- Utilizar rede elétrica menos sobrecarregada para instrumentação e painel de comando do túnel.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1 Considerações finais

O estudo da dinâmica de secagem requer equipamentos e materiais específicos para sua realização, tal como equipamentos avançados para caracterização física do material a granel, assim como túnel de secagem para replicar condições ambientais que se apresentam nas localidades dos empreendimentos minerais. O túnel de secagem foi projetado, construído e testado parcialmente para atender esta demanda. A calibração do controlador de temperatura, composto basicamente pelo CLP e por chave estática, mostrou-se satisfatória pois a temperatura se manteve no setpoint durante todos os ensaios realizados. Embora o sistema de umidificação ainda não tenha sido empregado, a sala em que o túnel se encontra instalado é refrigerada com reduzida interferência das variações ambientais externas. Um sistema de umidificação por ultrassom foi selecionado por critérios de segurança, simples instalação e integração com o sistema de controle. O ar-condicionado inverter não apresentou possibilidade de integração com sistema de controle devido aos protocolos de comunicação serial restritos do fabricante, sugere-se substituir o compressor BLC por um conjunto de compressor e variador de velocidade facilmente integrável ao CLP. A elevada quantidade de inversores de frequência pode ser dada como a principal razão para a ocorrência dos harmônicos que interferem no sensor de umidade. Algumas soluções foram propostas, tal como instalação de filtro EMI no sensor de umidade e aterramento das carcaças de todos os motores presentes no laboratório.

Observou-se a diminuição do tempo de secagem em função do aumento da temperatura em todos os ensaios, que pode ser explicado pelo aumento dos mecanismos de condução na superfície de secagem do material. A velocidade também atua na diminuição do tempo de secagem, algumas vezes de forma mais intensa que a temperatura, atuando na potencialização do mecanismo de convecção na superfície de secagem do material. Nas maiores temperaturas e velocidades foram notados apenas dois períodos nas curvas de taxa de secagem, enquanto três diferentes períodos foram observados nos ensaios realizados com menores temperaturas e velocidade. Como esperado, a dinâmica de secagem se mostrou de

forma semelhante à literatura e contribui como base de dados para melhor compreensão da dinâmica de secagem destes materiais possibilitando utilização para o desenvolvimento de modelos matemáticos e numéricos. Apesar de não estar completamente desenvolvido, o túnel de secagem demonstrou boa estabilidade dos parâmetros ambientais mostrando-se como ferramenta fundamental para pesquisas futuras, podendo ser melhorado após implementação dos demais componentes e calibração das malhas de controle.

## 5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Em relação a infraestrutura para melhor operação do túnel de secagem, sugere-se:

1. Instalar sistema de umidificação por ultrassom, conforme dimensionado neste trabalho.
2. Troca da colmeia feita em plástico por material metálico de alumínio ou liga de cobre, obedecendo os diâmetros e comprimentos dimensionados.
3. Como proteção da bancada, instalar um gerador para manter o ventilador funcionando por pelo menos 5 minutos após uma eventual queda de energia, para evitar aumentos elevados de temperatura nas resistências elétricas e possíveis danos nas mesmas ou na estrutura do túnel.
4. Instalar rede de água limpa para alimentação do tanque de água do sistema de umidificação.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

1. Avaliar efeito da umidade relativa sobre a secagem de minério.
2. Avaliar a espessura do leito na secagem do minério.
3. Investigar período de secagem à taxa constante realizando ensaios com umidades equivalentes ao ponto de saturação dos minérios.
4. Avaliar secagem de minério coberto por camada de fluido supressor de poeira.
5. Avaliação da resistência do fluido supressor às condições ambientais presentes nas instalações da Vale e em condições extremas de temperatura, velocidade e umidade relativa.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR 7180 Solo - Análise granulométrica** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [s.l: s.n.].
- ABNT. **ABNT NBR 9939 - Agregado graúdo - Determinação do teor de umidade total - Método de ensaio** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [s.l: s.n.].
- ABNT. **ABNT NBR 16916 Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [s.l: s.n.].
- ANTAQ. **Relatório de gestão, 2020.** Disponível em: <<https://nuvem.antaq.gov.br/index.php/s/BSOAHXnfgldGr0G>>
- ANTT. **Relatório anual de atividades - exercício 2019, 2010.** Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/relatorios-anuais>>
- BARLOW, J. B.; WILLIAM H. RAE, J.; POPE, A. **LOW-SPEED WIND TUNNEL TESTING.** [s.l.] Wiley &, 1999.
- BELL, J. H.; RABBINDRA D. MEHTA. **CONTRACTION DESIGN FOR SMALL LOW-SPEED WIND TUNNELS,** 1988.
- BORBA, M. V. S. **AVALIAÇÃO DO USO DE DIFERENTES TIPOS DE POLÍMEROS DE PÓ NO CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DURANTE O TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO NA EFVM - ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS.** [s.l.] Instituto Tecnológico Vale, 2017.
- CALAUTIT, J. K. et al. A validated design methodology for a closed-loop subsonic wind tunnel. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 125, p. 180–194, 2014.
- COHEN, H.; COON, G. A. Theoretical consideration of retarded control. **Trans. Asme**, v. 75, p. 827–834, 1953.
- COPELAND, C. R.; KAWATRA, S. K. Dust suppression in iron ore processing plants. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 22, n. 4, p. 177–191, 2005.
- DILLEY, A. C. On the Computer Calculation of Vapor Pressure and Specific Humidity Gradients from Psychrometric Data. **Journal of Applied Meteorology (1962-1982)**, v. 7, n. 4, p. 717–719, 1968.
- FOUST, A. S. **Princípios de Operações Unitárias.** [s.l: s.n.].
- GONTIJO, C. DE F. Caracterização De Minério De Ferro Para Desaguamento. **18º Simpósio de mineração**, v. 47, p. 198–207, 2017.



- JÚNIOR, R. et al. Bancada Para Estudo Da Emissão De Poeira Em Condições Dinâmicas. n. August, 2018.
- KLINE, S.; MCCLINTOCK, F. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. **Mechanical Engineering**, v. 75, p. 3–8, 1953.
- KULKARNI, V.; SAHOO, N.; CHAVAN, S. D. Simulation of honeycomb–screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 1, p. 37–45, 2011.
- MEHTA, R. D. THE AERODYNAMIC DESIGN OF BLOWER TUNNEL WITH WIDE-ANGLE DIFFUSERS. **Prog. Aerospace Sci.**, v. 18, p. 59–120, 1977.
- MEHTA, R. D.; BRADSHAW, P. Design rules for small low speed wind tunnels. **The Aeronautical Journal (1968)**, v. 83, n. 827, p. 443–453, 1979.
- MOFFAT, R. J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 104, n. 2, p. 250–258, 1982.
- MOHAN, V. P. C.; TALUKDAR, P. Design of an experimental set up for convective drying: Experimental studies at different drying temperature. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 49, n. 1, p. 31–40, 2013.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying, fourth edition**. fourth edi ed. [s.l.] Taylos & Francis group, 2014.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª ed. [s.l.] Pearson Pretience Hall, 2010.
- PINTO, T. C. DE S. et al. Mecanismos De Secagem Visando a Redução De Umidade Em Sinter Feed De Minério De Ferro. **ABM Week**, p. 1016–1024, 2017.
- RÊGO SEGUNDO, A. K. et al. Capacitive impedance measurement: Dual-frequency approach. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 11, 2019.
- SANTOS, A. M. DOS A. **O tamanho das partículas de poeira suspensas no ar dos ambientes de trabalho**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- SANTOS JÚNIOR, R. M. DOS. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DE CIRCUITO ABERTO**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2015.
- SANTOS JÚNIOR, R. M. DOS. **Universidade Federal do Pará Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2018.

SOUZA PINTO, T. C. et al. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. **Drying Technology**, v. 39, n. 10, p. 1359–1370, 2021.

WATTENDORF, F. L. **Factors influencing the energy ratio of return flow wind tunnels**. Fifth International Congress for Applied Mechanics, Cambridge. **Anais...**1938

WIEGHARDT, K. E. G. On the Resistance of Screens. **Aeronautical Quarterly**, v. 4, n. 2, p. 186–192, 1953.

ZHANG, Z.; YANG, S.; LIU, D. Mechanism and mathematical model of heat and mass transfer during convective drying of porous materials. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 28, n. 5, p. 337–351, 1999.

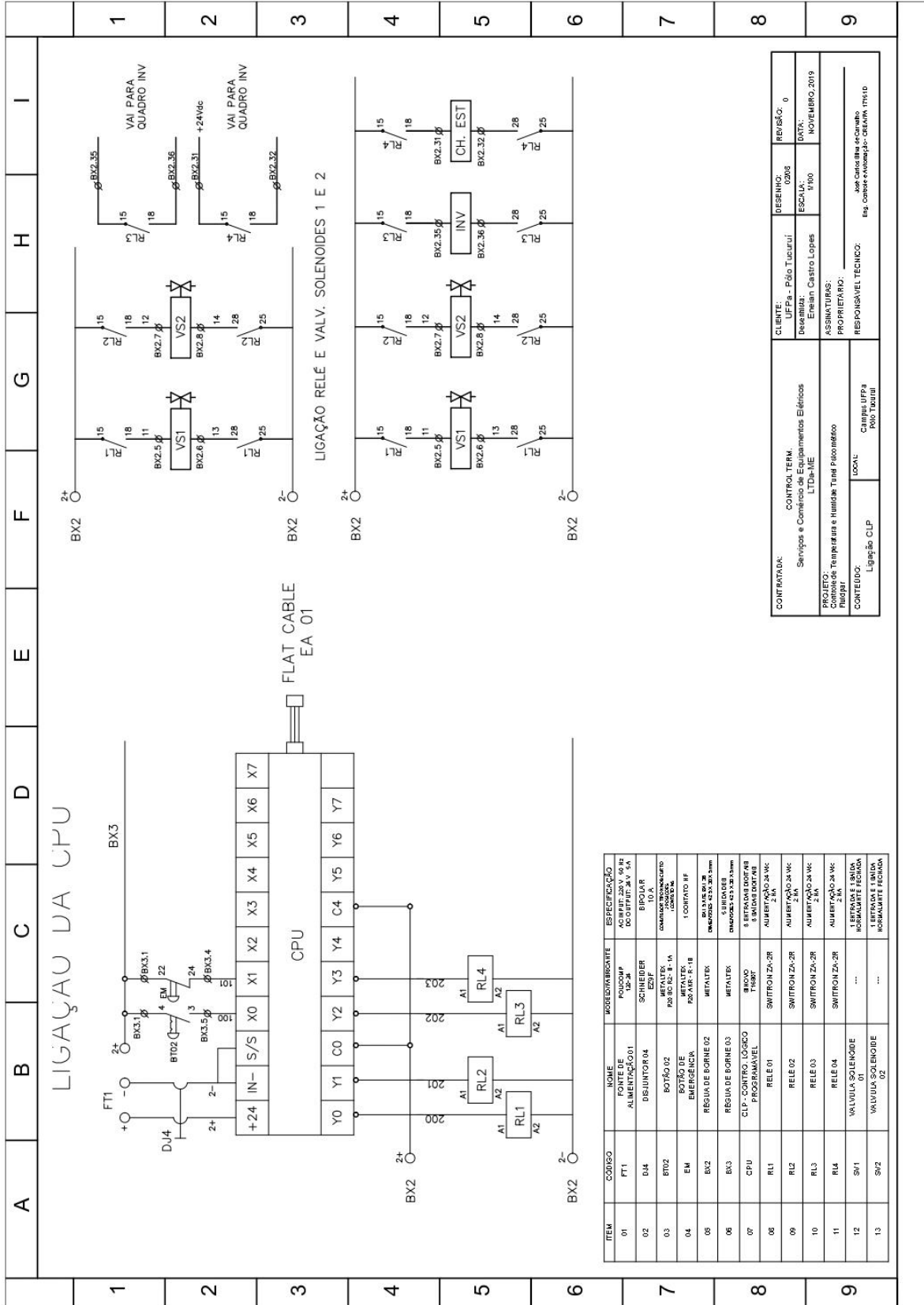
ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. Optimum Settings for Automatic Controllers. **Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of The Asme**, v. 115, p. 220–222, 1942.

## APÊNDICE A – granulometria do sinter feed.

**Granulometria do sinter feed.**

<b>Malha (µm)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Retido (%)</b>	<b>Retido Acumulado (%)</b>	<b>Passante Acumulado (%)</b>
19100	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
12700	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
9520	7,75	0,18%	0,18%	99,82%
4760	382,72	9,26%	9,44%	90,56%
3350	322,53	7,82%	17,26%	82,74%
2230	222,79	5,41%	22,67%	77,33%
2000	102,52	2,51%	25,18%	74,82%
1180	376,16	9,10%	34,28%	65,72%
1000	77,67	1,88%	36,16%	63,84%
850	267,84	6,43%	42,59%	57,41%
600	157,07	3,80%	46,39%	53,61%
425	158,45	3,84%	50,23%	49,77%
250	274,31	6,65%	56,88%	43,12%
180	358,61	8,63%	65,51%	34,49%
150	155,76	3,84%	69,35%	30,65%
125	464,84	11,33%	80,68%	19,32%
106	252,09	6,12%	86,81%	13,19%
90	312,26	7,53%	94,34%	5,66%
53	167,58	4,05%	98,39%	1,61%
20	65,38	1,59%	99,98%	0,02%
15	0,92	0,02%	100,00%	0,00%

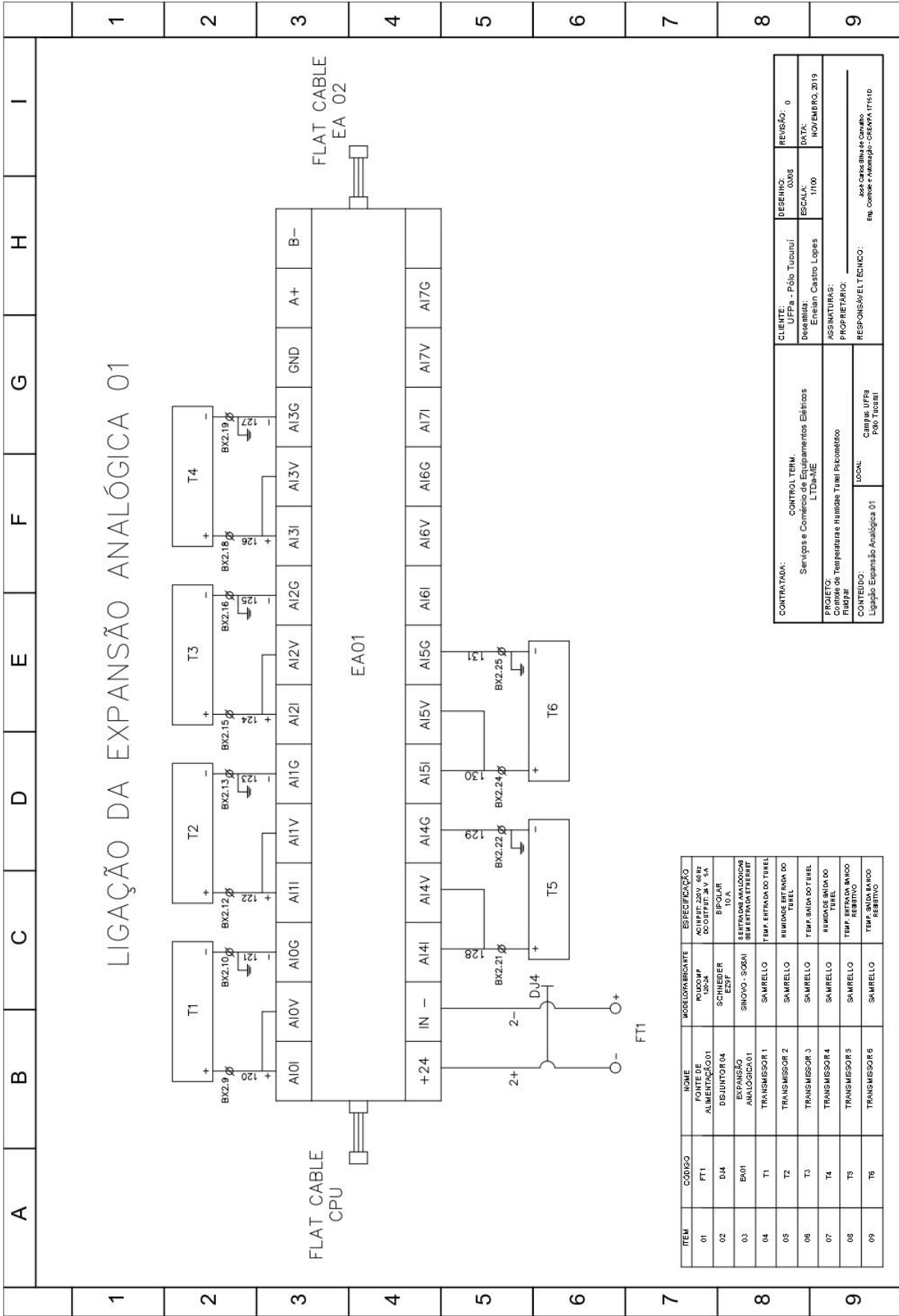
# ANEXO A - DIAGRAMAS ELÉTRICOS



<b>CONTRATADA:</b> Serviços e Comércio de Equipamentos Elétricos LTDA-ME	<b>CLIENTE:</b> UFPA - Polo Tucuruí Desenhista: Eneilson Castro Lopes	<b>DESENHO:</b> 0208 <b>DATA:</b> NOVEMBRO/2019
<b>PROJETO:</b> Projeto de Temperatura e Humidade Total Posicionamento	<b>ASSINATURA:</b> PROPRIETÁRIO:	<b>REVISÃO:</b> 0
<b>CONTEÚDO:</b> Ligação CLP	<b>LOCAL:</b> Campus UFPA Polo Tucuruí	<b>RESPONSÁVEL TÉCNICO:</b> Eng. Cones e Nomeação: CREA/M 175110

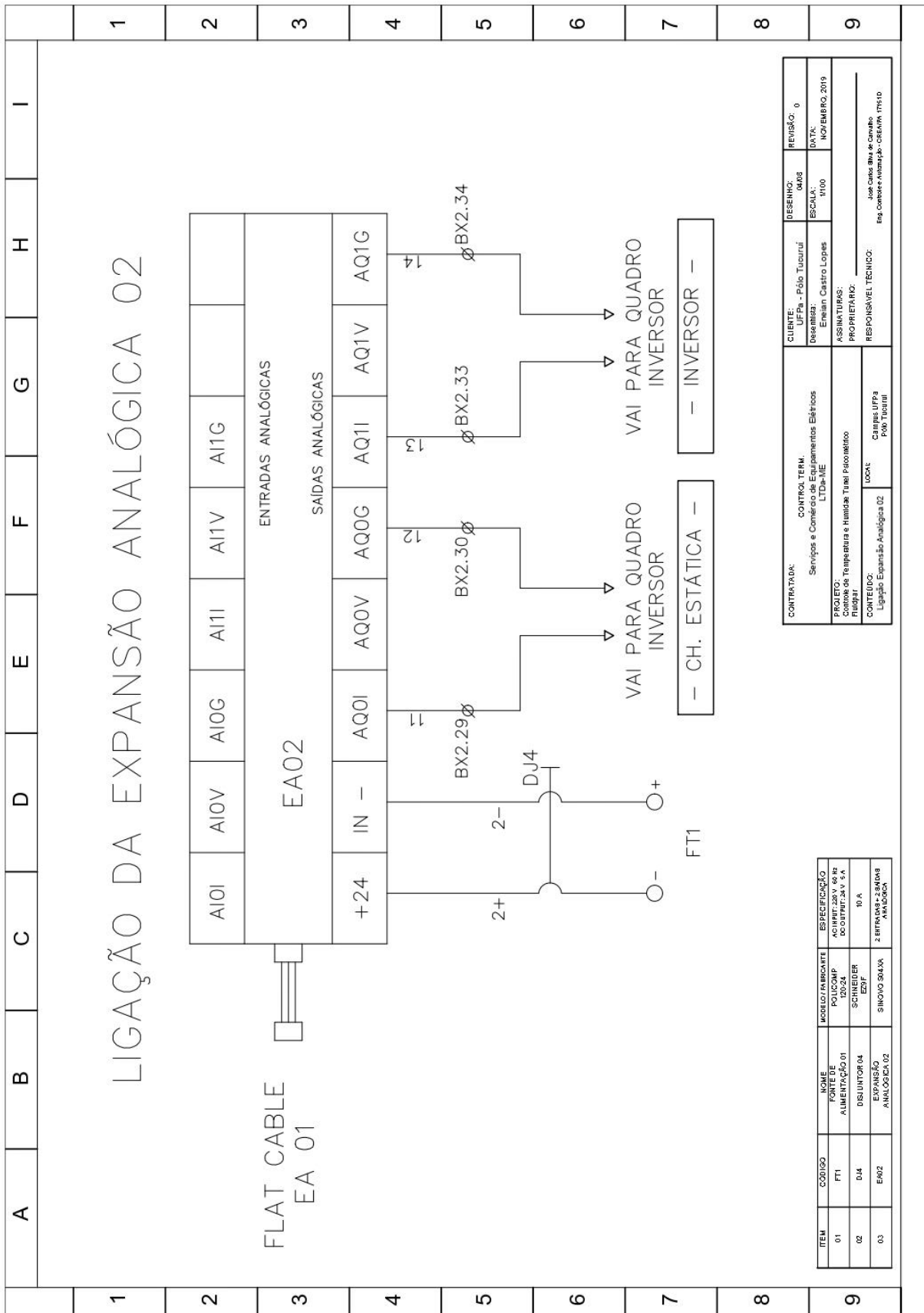
ITEM	CODIGO	NOME	QUANTIDADE	ESPECIFICAÇÃO
01	FT1	FOURTE	1	ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO 24V 5A
02	D1J4	DISJUNTOR 04	1	BIPOLAR SCHNEIDER 10 A.
03	BT02	BOTÃO DE EMERGENÇA	1	METALEX POS. 18x18x18mm 1 CONTATO NF
04	EM	BOTÃO DE EMERGENÇA	1	METALEX POS. 18x18x18mm 1 CONTATO NF
05	BX2	RESUA DE BORNE 02	2	METALEX 25x25x30mm
06	BX3	RESUA DE BORNE 03	3	METALEX 25x25x30mm
07	CPU	CLP - CONTROLADOR PROGRAMAVEL	1	8 BIT 24VDC 48 S 8 16VDC 24VDC 24VDC
08	RL1	SWITRON ZAC-2R	1	RELE 01
09	RL2	SWITRON ZAC-2R	1	RELE 02
10	RL3	SWITRON ZAC-2R	1	RELE 03
11	RL4	SWITRON ZAC-2R	1	RELE 04
12	SV1	VALVULA SOLENOIDE 01	1	24VDC
13	SV2	VALVULA SOLENOIDE 02	1	24VDC

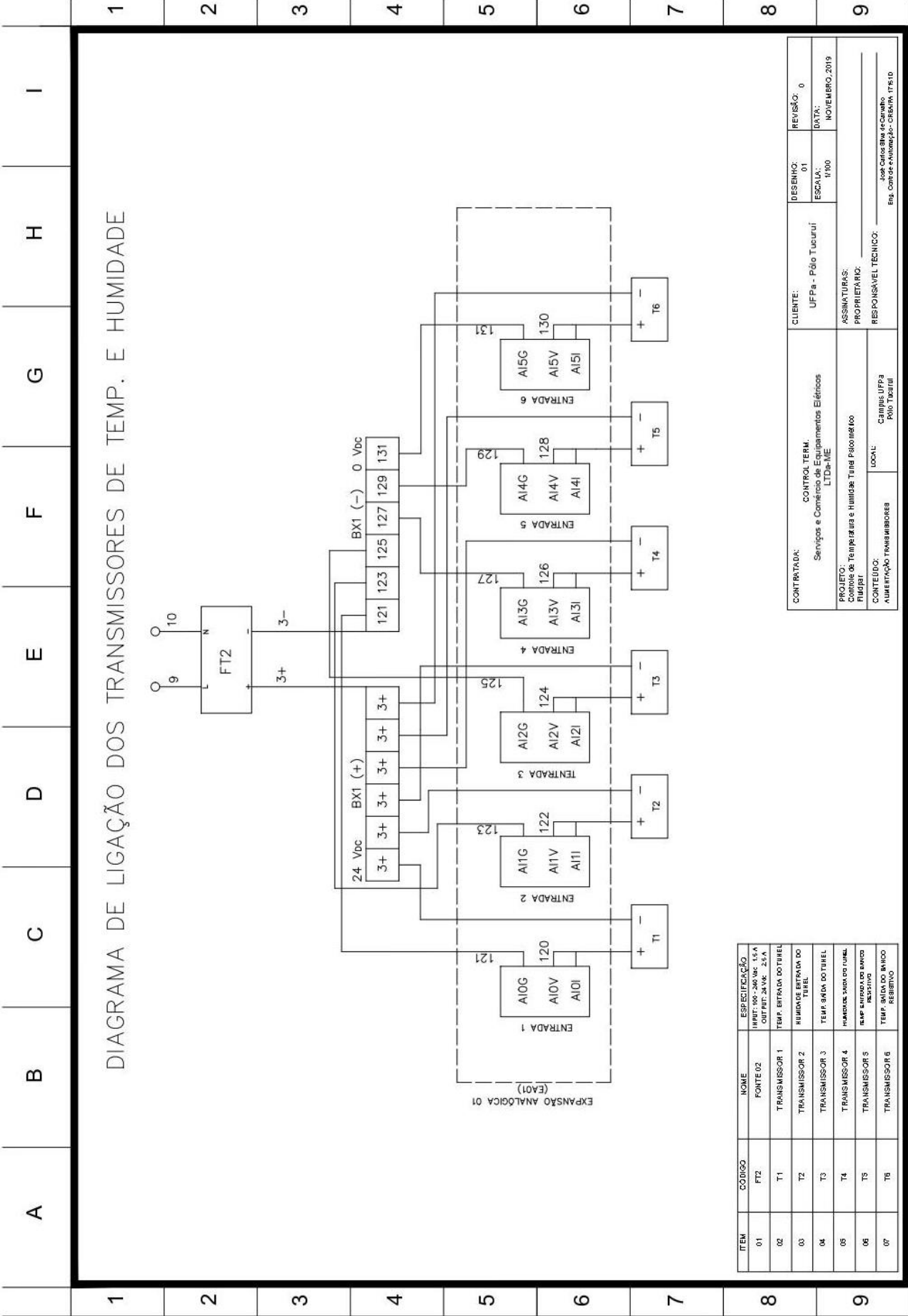
LIGAÇÃO DA EXPANSÃO ANALÓGICA 01



CLIENTE:	UFFPa - Pólo Tucuruí	DESENHO:	03068	REVISÃO:	0
Desenhista:	Eneilan Castro Lopes	ESCALA:	1/100	DATA:	NOVEMBRO, 2019
ASSINATURAS:		PROPRIETARIO:			
RESPONSÁVEL TÉCNICO:		RESPONSÁVEL TÉCNICO:			

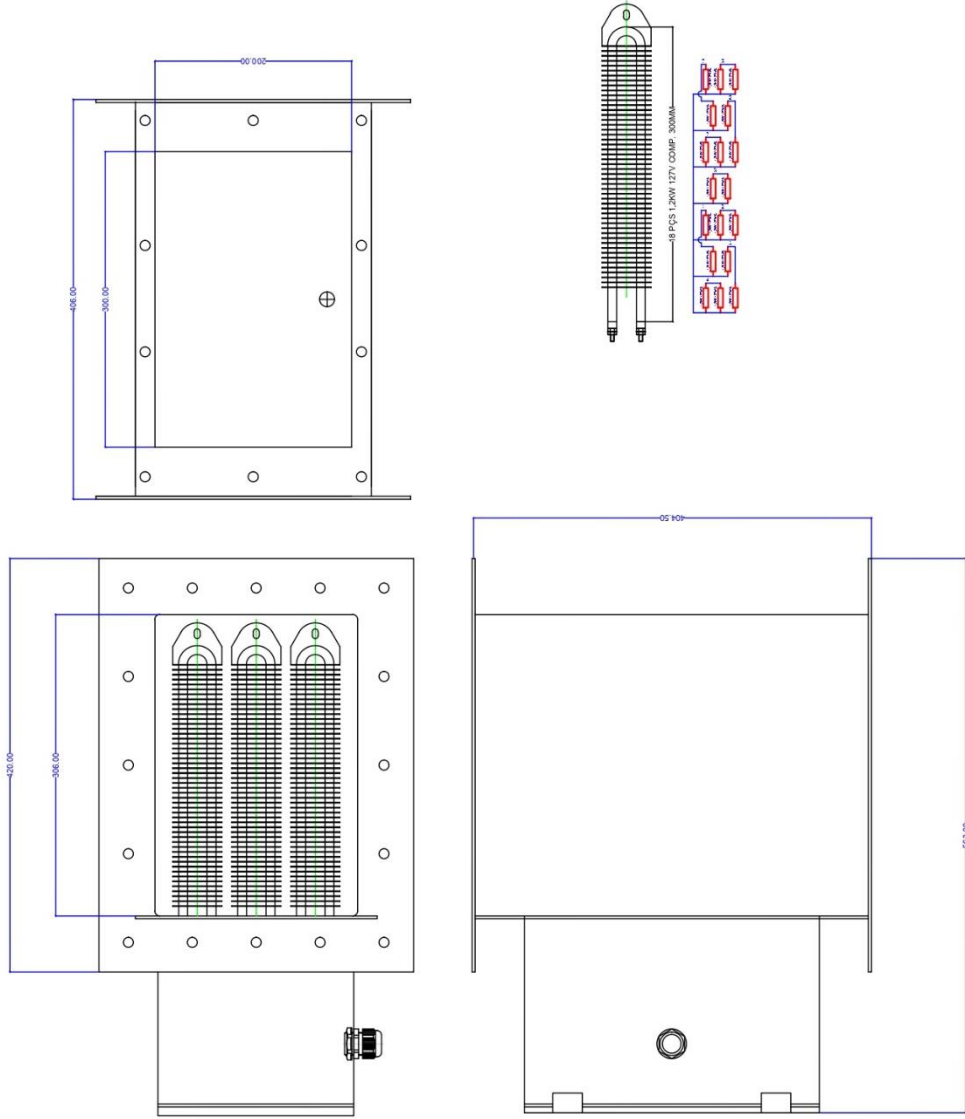
CONTROL TERM:	Servicos e Comércio de Equipamentos Elétricos L'DANIÉ
PROJETO:	Calor de Temperatura e Humidade Tubel Psicométrico
LOCAL:	Campus UFFPa Pólo Tucuruí
LOCAL:	Jose Carlos de Carvalho Eng. Civil e Engenharia - SBCARVA 171610






ITEM	CODIGO	NOME	ESPECIFICAÇÃO
01	FT2	FORNE 02	IPRBT-000-240-10-15-A CORRENTE: 24 Vdc - 25A
02	T1	TRANSMISSOR 1	TEMP. ENTRADA DO TUNEL
03	T2	TRANSMISSOR 2	HUMIDADE ENTRADA DO TUNEL
04	T3	TRANSMISSOR 3	TEMP. SAIDA DO TUNEL
05	T4	TRANSMISSOR 4	HUMIDADE SAIDA DO TUNEL
06	T5	TRANSMISSOR 5	TEMP. ENTRADA DO BANCO RESISTIVO
07	T6	TRANSMISSOR 6	TEMP. SAIDA DO BANCO RESISTIVO

CONTRATADA:	Serviços e Comércio de Equipamentos Elétricos LTDa-ME	CLIENTE:	UFPA - Polo Tucuruí	DESENHO:	01	REVISÃO:	0
PROJETO:	Controle de Temperatura e Humidade Túnel Paleontológico	ASSINATURAS:		ESCALA:	1/100	DATA:	NOVEMBRO, 2019
FUNÇÃO:	PROJETAÇÃO	PROPRIETARIO:					
CONTEUDO:	ALIMENTAÇÃO TRANSMISSORES	RESPONSÁVEL TÉCNICO:					
LOCAL:	Campus UFPA Polo Tucuruí						
Eng. Carlos Bina de Carvalho Eng. Controle e Automação - CIBAVIA TR&ID							

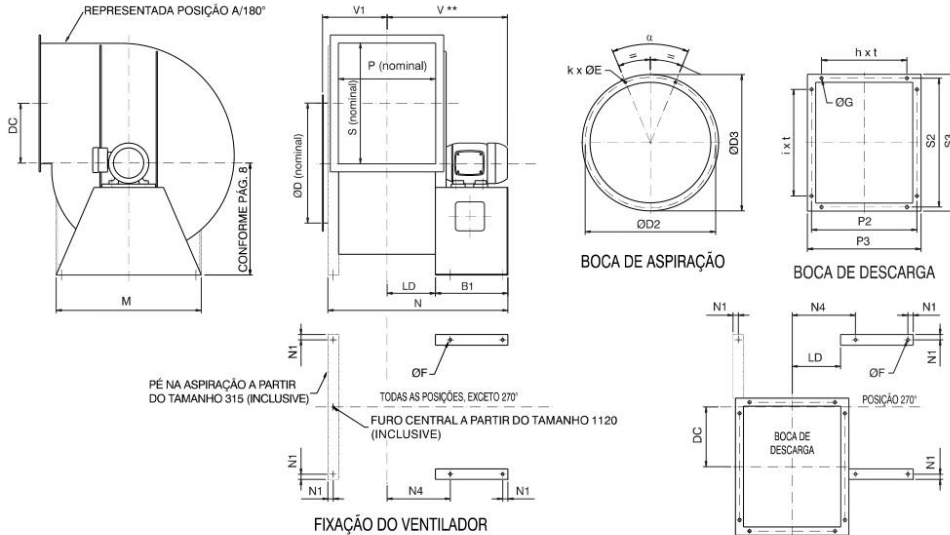


		<b>DELTA RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS LTDA</b>		Data: 20/06/2019
Des.: Durval Reis	Desic.: SISTEMA DE AQUEC. AR	Dimensões: 200X300X400 MM	Potência: 24 KW	Tensão: 220 VAC
Proj.: Delta Resistências	Obs.: AÇO CARBONO	EXTRUTURA 85°C	Rev.: 001	Escala: S1E
ESTE DESENHO É DE PROPRIEDADE DA DELTA RESISTÊNCIAS LTDA. AO DEIXAR A FÁBRICA DEVEVA SER USADO APENAS COM UM FIM ESPECÍFICO, NÃO DEVENDO SER COPIADO OU REPRODUZIDO POR NENHUM MOTIVO, NEM SER APRESENTADO À ARRECAÇÃO DE TERCEIROS SEM AUTORIZAÇÃO EXPRESSA DA EMPRESA, SENDO QUE SUA RESTITUIÇÃO DEVEVA SER IMEDIATA QUANDO SOLICITADA.				



# ANEXO B – INFORMAÇÕES DO VENTILADOR

## DIMENSÕES RLS ARRANJO 4



TAMANHO	DC	ØF	LD	M	N1	N4	V1	PESO (kgf) *				BOCA DE ASPIRAÇÃO					BOCA DE DESCARGA									
								CL. I	CL. II	CL. III	CL. IV	ØD	ØD2	ØD3	k x ØE	α	P	P2	P3	h x t	S	S2	S3	i x t	ØG	
200	100	10	81	300	19	142,5	132	9	-	-	-	200	233	253	8 x Ø9	45°	160	196	228	1 x 80	200	236	268	2 x 80	20	11
224	112	10	91	324	19	152,5	142	11	-	-	-	224	257	277	8 x Ø9	45°	180	216	248	1 x 80	224	260	292	3 x 80	21	11
250	125	10	101	360	19	162,5	152	14	14	-	-	250	293	317	8 x Ø9	45°	200	236	268	2 x 80	250	286	318	3 x 80	21	11
280	140	10	113	390	19	174,5	164	16	16	-	-	280	323	347	8 x Ø9	45°	224	260	292	2 x 80	280	316	348	3 x 80	21	11
315	157,5	10	126,5	425	19	187,5	178	25	25	-	-	315	358	382	8 x Ø9	45°	250	287	319	2 x 80	315	351	383	4 x 80	21	11
355	177,5	10	141,5	465	19	202,5	193	31	43	-	-	355	399	423	8 x Ø9	45°	280	317	349	3 x 80	355	391	423	4 x 80	21	11
400	200	12	159	520	25	224	235	45	62	-	-	400	452	480	8 x Ø11	45°	315	358	396	2 x 100	400	442	480	4 x 100	14	14
450	225	12	179	570	25	249	255	55	-	-	103	450	502	530	8 x Ø11	45°	355	398	436	3 x 100	450	493	531	4 x 100	14	14
500	250	12	201,5	620	25	271,5	278	91	91	-	-	500	552	580	8 x Ø11	45°	400	443	481	3 x 100	500	543	581	5 x 100	14	14
560	280	12	227	680	25	297	303	113	118	-	-	560	612	640	16 x Ø11	22°30'	450	494	532	4 x 100	560	604	642	5 x 100	14	14
630	315	12	252	750	25	322	329	150	156	-	-	630	684	712	16 x Ø11	22°30'	500	544	582	4 x 100	630	674	712	6 x 100	14	14
710	355	14	282	850	32	365	384	234	250	-	-	710	780	816	16 x Ø14	22°30'	560	616	666	4 x 125	710	766	816	6 x 125	14	14
800	400	14	317,5	950	32	400,5	419	310	310	368	-	800	870	906	16 x Ø14	22°30'	630	687	737	4 x 125	800	857	907	6 x 125	14	14
900	450	14	357,5	1050	32	440,5	459	387	413	-	-	900	970	1006	16 x Ø14	22°30'	710	767	817	5 x 125	900	957	1007	7 x 125	14	14
1000	500	14	402,5	1150	32	485,5	505	458	587	-	-	1000	1070	1106	16 x Ø14	22°30'	800	857	907	6 x 125	1000	1057	1107	8 x 125	14	14
1120	560	18	453,5	1280	38	545,5	581	575	994	-	-	1120	1191	1227	24 x Ø14	15°	900	959	1009	6 x 125	1120	1179	1229	9 x 125	14	14
1250	625	18	505	1410	38	607	632	632	1189	-	-	1250	1321	1357	24 x Ø14	15°	1000	1076	1140	6 x 140	1250	1323	1387	9 x 140	14	14
1400	700	21	565	1560	44	676	692	716	1603	-	-	1400	1471	1507	24 x Ø14	15°	1120	1196	1260	7 x 140	1400	1473	1537	10 x 140	14	14

TAMANHO	POTÊNCIA MÍNIMA RECOMENDADA (cv)			MOTOR CARCAÇA 71			MOTOR CARCAÇA 80			MOTOR CARCAÇA 90			MOTOR CARCAÇA 100L			MOTOR CARCAÇA 112M			MOTOR CARCAÇA 132			MOTOR CARCAÇA 160					
	P <sub>1</sub> / P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub> / P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub> / P <sub>6</sub>	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V			
200	0,16	0,25	0,5	0,75	250	-	333	-	-	250	-	374	399	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
224	0,16	0,25	0,5	0,75	250	-	343	-	-	250	-	384	409	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
250	0,16	0,25	0,5	1,0	250	-	353	-	-	250	-	394	419	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
280	0,16	0,25	0,5	2,0	250	-	366	250	384	250	-	407	432	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
315	0,16	0,25	0,5	4,0	250	541	378	-	-	250	541	417	442	280	571	489	-	-	-	-	-	-	-	-			
355	0,16	0,25	0,75	7,5	250	571	391	250	571	409	250	571	432	457	-	-	-	280	601	488	315	636	526	-			
400	0,25	0,5	2,0	12,5	-	-	-	250	618	409	250	618	427	452	-	-	-	-	355	723	-	581	-	-			
450	0,33	0,75	3,0	25,0	-	-	-	250	658	427	250	658	445	470	250	658	506	-	-	-	-	-	-	450	858	677	721
500	0,5	1,5	5,0	-	-	-	-	-	-	-	250	703	468	493	280	733	529	280	733	546	-	-	-	-	-	-	-
560	1,0	3,0	10,0	-	-	-	-	-	-	-	250	754	518	518	250	754	554	-	-	-	315	819	609	-	-	-	-
630	2,0	4,0	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	280	834	600	355	909	638	676	400	954	754	-

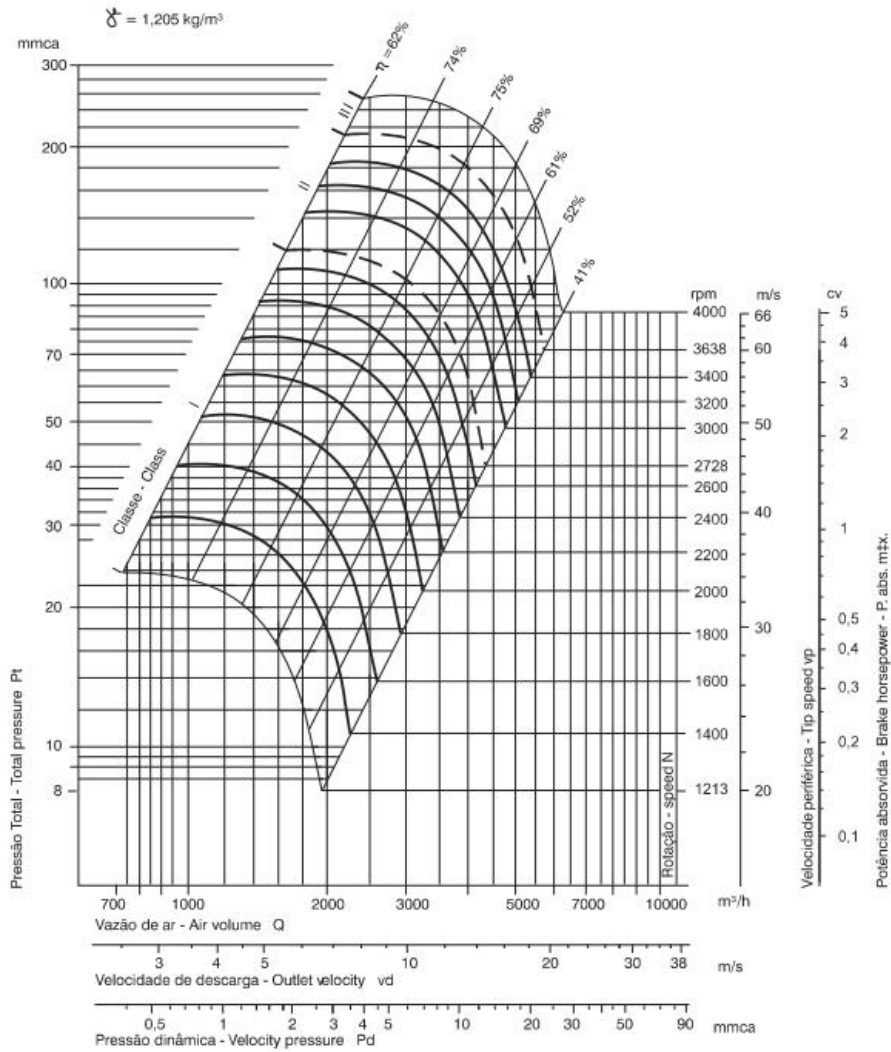
TAMANHO	POTÊNCIA MÍNIMA RECOMENDADA (cv)			MOTOR CARCAÇA 132			MOTOR CARCAÇA 160			MOTOR CARCAÇA 180			MOTOR CARCAÇA 200			MOTOR CARCAÇA 225SM			MOTOR CARCAÇA 250SM			MOTOR CARCAÇA 280SM			MOTOR CARCAÇA 315SM		
	P <sub>1</sub> / P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub> / P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub> / P <sub>6</sub>	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V	B1	N	V
710	3,0	7,5	25,0	355	983	666	704	450	1078	782	826	450	1078	848	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
800	6,0	15,0	50,0	-	-	-	-	450	1149	833	877	-	-	-	560	1259	-	1002	560	1259	1050	-	-	-	-	-	-
900	10,0	25,0	-	-	-	-	-	450	1229	-	906	500	1279	928	966	560	1339	-	1031	-	-	-	-	-	-	-	-
1000	20,0	50,0	-	-	-	-	-	500	1369	-	1011	-	-	-	-	-	-	-	560	1429	1124	-	-	-	-	-	-
1120	30,0	75,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	630	1613	1251	710	1693	1368	-	-	-
1250	60,0	125,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	630	1716	1324	800	1886	1441	800	1886	1531
1400	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	710	1929	1490	-	-	-	-	-	-

\* PESO REFERE-SE AO VENTILADOR SEM O MOTOR, NA POSIÇÃO 180°, CONFORME REPRESENTADO ACIMA, E PARA O MAIOR MOTOR DA CLASSE.  
 \*\* COTA "V" PODE SOFRER VARIAÇÕES EM FUNÇÃO DO FABRICANTE DO MOTOR E DE AJUSTES NA MONTAGEM.

# RLS 315

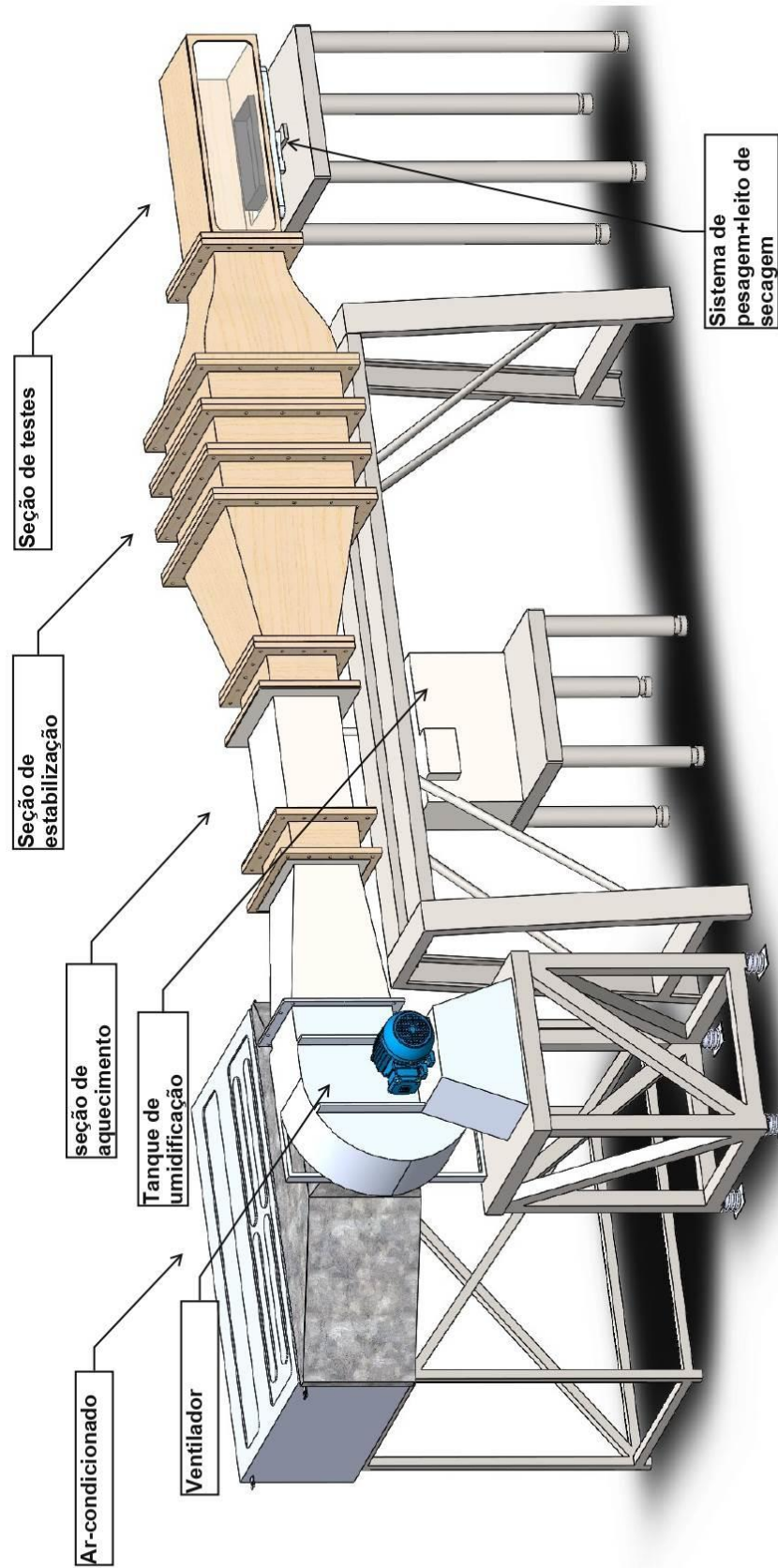


O desempenho mostrado é para instalação tipo B - aspiração livre / descarga dutada (ANSI/AMCA Standard 210-95 figura 7). Os dados de desempenho não incluem os efeitos ocasionados por restrições, obstáculos ou acessórios colocados no fluxo de ar. A potência absorvida (cv) não inclui as perdas da transmissão.

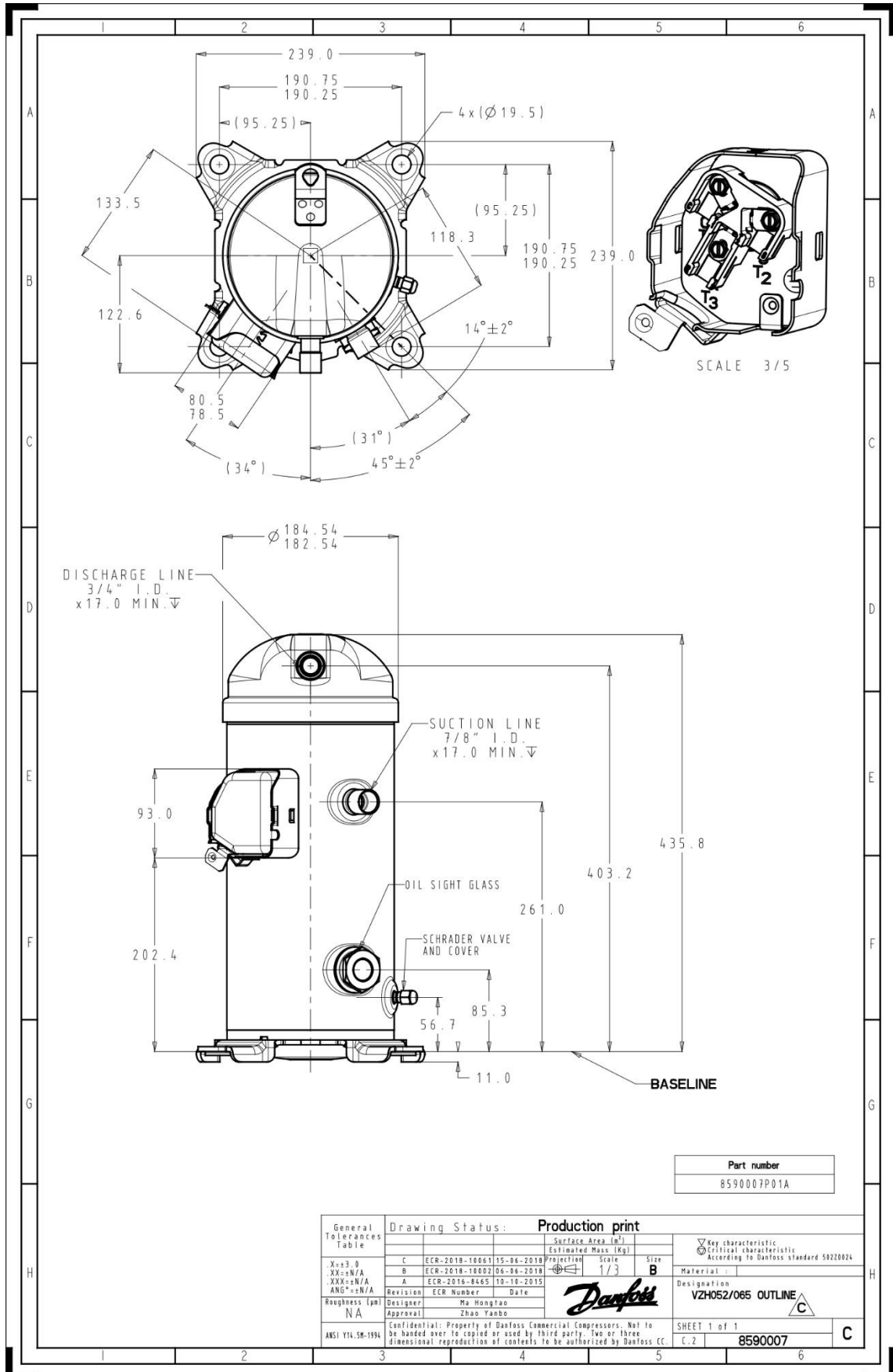


Diâmetro do rotor Impeller diameter	D = 315 mm		$\phi = 315$ mm
			A = 0,078 m <sup>2</sup>
Momento de inércia Moment of inertia	- CL. I e II = 0,068 kg.m <sup>2</sup> GDz - CL. III = 0,216 kg.m <sup>2</sup>		BxC = 250 x 315 mm
			A = 0,079 m <sup>2</sup>

## ANEXO C – VISÃO GERAL DO TÚNEL DE SECAGEM



ANEXO D – DIMENSÕES DO COMPRESSOR



Part number
8590007P01A

General Tolerances Table	Drawing Status: <b>Production print</b>		Surface Area (m <sup>2</sup> )	Key characteristic Critical characteristic According to Danfoss standard 59220024
	C	ECR-2019-10061 15-06-2019	Estimated Mass (Kg)	
	B	ECR-2018-10002 06-04-2018	Projection Scale	
	A	ECR-2016-8465 10-10-2015	1/3	
.X=±3.0 XX=±N/A XXX=±N/A ANG=±N/A	Revision	ECR Number	Date	Size <b>B</b>
Roughness (µm) NA	Designer	Ma Hongtao		Material:
ANSI Y14.3M-1994	Approval	Zhao Yanbo		Designation
	Confidential: Property of Danfoss Commercial Compressors. Not to be handed over to copied or used by third party. Two or three dimensional reproduction of contents to be authorized by Danfoss CC.			VZH052/065 OUTLINE <sup>△</sup> C
				SHEET 1 of 1
				C.2 <b>8590007</b> <b>C</b>