

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



ERIK PAULO DONATTI

**INVESTIGAÇÃO E PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA
PROBLEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS DE UMA
MÁQUINA DE USINAGEM CNC EM UMA INDÚSTRIA DE
FABRICAÇÃO DE PEÇAS MECÂNICAS**

VITÓRIA – ES
2021

ERIK PAULO DONATTI

INVESTIGAÇÃO E PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA PROBLEMAS
ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS DE UMA MÁQUINA DE USINAGEM CNC
EM UMA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS MECÂNICAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Erik Paulo Donatti**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Eng. Heliomar Guimarães Guzzo

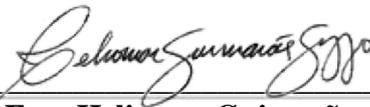
VITÓRIA – ES
2021

ERIK PAULO DONATTI

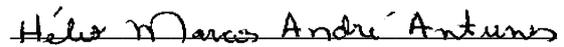
INVESTIGAÇÃO E PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA PROBLEMAS
ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS DE UMA MÁQUINA DE USINAGEM CNC
EM UMA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS MECÂNICAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Erik Paulo Donatti**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Eng. Heliomar Guimarães Guzzo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Prof. Eng. José Luiz Borba
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família e amigos que me apoiaram nesta minha jornada acadêmica. Também agradeço as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a elaboração deste projeto, em especial ao meu orientador Heliomar Guimarães Guzzo que esteve presente em todas as etapas até a construção desse trabalho. Um último agradecimento para minha mãe pelo seu apoio e incentivo incondicionais nas minhas decisões.

RESUMO

Para aumentar a produtividade de indústrias que realizam suas atividades por meio de uma extensa gama de maquinários mecânicos, é possível que haja uma automatização de seus equipamentos, de forma que a demanda crescente de serviços possa ser atendida com a redução do tempo de operação e de perdas, além de melhorar a qualidade do produto final em relação aos processos de operação manual anteriormente utilizados para a realização de uma mesma tarefa. A evolução tecnológica de máquinas industriais está diretamente atrelada ao seu nível de automatização, que ocorre por meio de dispositivos elétricos, equipamentos e módulos eletrônicos utilizando comandos programados para operar o processo, diminuindo assim o trabalho humano, os custos e otimizando a produção. Um exemplo pode ser observado quando se considera máquinas mecânicas de usinagem, que, com o surgimento das máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), tornaram-se muito mais eficientes na produção de peças, inclusive disponibilizando o operador para realizar outras tarefas em paralelo. Porém, juntamente com os benefícios da automatização, vem os problemas relacionados as avarias sofridas pelos dispositivos instalados dentro do painel elétrico durante a operação em um ambiente industrial, sejam na parte elétrica, sejam na parte eletrônica. O surgimento de um curto-circuito ou o comprometimento de apenas um componente de um módulo eletrônico pode resultar em horas, ou até mesmo dias, de máquina parada até que o problema seja identificado e solucionado, gerando grandes custos e perdas de produção.

O presente projeto visa identificar as causas de falhas de operação em uma máquina de centro de usinagem CNC da marca ROMI, modelo D600, a partir de relatos por parte do proprietário e operadores de uma fábrica de usinagem localizada em Cariacica - Espírito Santo, através da investigação de suas partes mecânicas, elétricas e eletrônicas e das condições ambientais nas quais a máquina está inserida. O projeto também aborda as soluções mais eficazes, de fácil implantação e de menores custos que podem ser adotada para os problemas encontrados.

Palavras-chave: Máquinas CNC. Usinagem. Módulos eletrônicos. Painel Elétrico.

ABSTRACT

To increase the productivity of industries that carry out their activities through a wide variety of mechanical machinery, it is possible that their equipment can be automated, so that the growing demand for services can be met by reducing operating time and losses, in addition to improving the quality of the final product compared to the manual operation processes previously used to perform the same task. The technological evolution of industrial machines is directly linked to their level of automation, which occurs through electrical devices, equipment and electronic modules using programmed commands to operate the process, thus reducing human work, costs and optimizing production. An example can be seen when considering mechanical machining, which, with the emergence of CNC machines (Computer Numerical Control), have become much more efficient in the production of parts, allowing the operator to be available to perform other tasks at the same time. However, along with the benefits of automation, comes issues related to damages in devices installed inside the electrical panel during operation in the industrial environment, whether electric or electronic. The event of a short circuit or damage of only one component of an electronic module can result in hours, or even days, of machine downtime until the problem is identified and solved, which means large costs and production losses.

This project aims to identify the reasons of operation failures in a CNC machining center made by ROMI, model D600, from reports by the owner and operators of a machining factory located in Cariacica - Espírito Santo, through the investigation of its mechanical, electrical and electronic parts and the environmental conditions where the machine is used. The project also addresses the most effective, easy-to-implement and lowest-cost solutions that can be adopted to help solving these problems.

Keywords: CNC machines. Machining. Electronic Modules. Electrical panel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eixos das máquinas de centro de usinagem	21
Figura 2 – Máquina de centro de usinagem com 5 eixos	22
Figura 3 – Comparação entre as montagens PTH e SMD.....	23
Figura 4 – Exemplos da relação entre métodos de instalação e métodos de referência	29
Figura 5 – Curvas B e C de atuação	33
Figura 6 - Sistema de deslocamento linear ROMI D600.....	47
Figura 7 – Diagrama multifilar do quadro geral de distribuição	51
Figura 8 – Vista frontal das descidas do SPDA e conexão com a telha de aço.....	53
Figura 9 - Vista posterior das descidas do SPDA e conexão com a telha de aço.....	53
Figura 10 – Corte A-A das descidas do SPDA e conexão com a telha de aço.....	54
Figura 11 – Planta baixa da malha de aterramento localizada na área de estoque	54
Figura 12 – Presença de óleo nos cabos elétricos.....	57
Figura 13 – Presença de óleo na entrada dos cabos elétricos e nos contadores	58
Figura 14 – Painel operando com abertura superior da porta (A) e marca de mancha de óleo e poeira (B).....	60
Figura 15 – Detalhe 3D da máquina de centro de usinagem ROMI D600.....	60
Figura 16 – Módulo de I/O queimado (A) e módulo de I/O novo (B)	62
Figura 17 – Ciclo de carga S6 com ciclo de carga de 600 segundos.....	64
Figura 18 – Curva de disparo do disjuntor existente	65
Figura 19 – Posição do <i>Datalogger</i> sobre o módulo Magazine	71
Figura 20 – Cabos elétricos após limpeza com álcool isopropílico	78
Figura 21 – Cabos elétricos após limpeza e papel com álcool isopropílico utilizado	78
Figura 22 – Detalhe 3D do centro de usinagem ROMI D600 com instalação do ar-condicionado Helmo	82
Figura 23 – Escolha das unidades de medida	87
Figura 24 – Escolha da tensão de alimentação	88
Figura 25 – Escolha dos parâmetros do painel elétrico – Parte 1	89
Figura 26 – Escolha entre painel vedado ou com ventilação	89
Figura 27 – Escolha do tipo de equipamento a ser utilizado	90
Figura 28 – Etapa 4 do dimensionamento do ar-condicionado para painel elétrico	91
Figura 29 – Especificação das temperaturas máximas de operação	92

Figura 30 – Etapa final do algoritmo.....	93
Figura 31 – Resultado final do dimensionamento do ar-condicionado.....	94
Figura 32 – Ar-condicionado para painel 1000W da Helmo.....	99
Figura 33 – Detalhe das vistas da porta e lateral interna do painel	100
Figura 34 - Detalhe das vistas da porta e lateral interna do painel com instalação do ar-condicionado Helmo.....	101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre a pressão de vapor saturado e temperatura dada pela equação de Tetens	40
Gráfico 2 – Curva de saturação do vapor d'água versus temperatura	42
Gráfico 3 - Teste do <i>datalogger</i> no interior de um congelador	49
Gráfico 4 - Teste do <i>datalogger</i> no interior de uma sala com ar-condicionado	50
Gráfico 5 - Medição de temperatura e umidade no interior do painel nos dias 29 e 30/07/2021	68
Gráfico 6 - Umidade absoluta no interior do painel elétrico nos dias 29 e 30/07/2021	68
Gráfico 7 - Medição de temperatura e umidade no ambiente externo ao painel nos dias 10 e 11/07/2021	69
Gráfico 8 - Umidade absoluta no ambiente externo ao painel elétrico nos dias 10 e 11/08/2021	70
Gráfico 9 - Medição de temperatura e umidade em cima do módulo Magazine nos dias 11 e 12/08/2021	71
Gráfico 10 – Umidade absoluta no interior do painel nos dias 11 e 12/08/2021	72
Gráfico 11 - Medição de temperatura e umidade em cima do módulo Magazine nos dias 30 e 31/08/2021	72
Gráfico 12 - Umidade absoluta no interior do painel nos dias 30 e 31/08/2021	73
Gráfico 13 - Medição de temperatura e umidade em cima do módulo Magazine nos dias 08 e 09/09/2021	74
Gráfico 14 - Umidade absoluta no interior do painel nos dias 08 e 09/09/2021	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sensibilidade de componentes eletrônicos à ESD.....	25
Tabela 2 – Fatores de correção de temperatura	31
Tabela 3 – Fatores de correção de agrupamento	31
Tabela 4 – Fator de potência do curto-circuito em função de I_{k0}	35
Tabela 5 – Valores aproximados da corrente de curto-circuito no secundário de transformadores	36
Tabela 6 – Composição de ar seco à temperatura de 15°C e pressão de 101325 Pa	38
Tabela 7 – Relatórios técnicos de manutenção.....	44
Tabela 8 – Potência dissipada pelos dispositivos no interior do painel	80
Tabela 9 – Orçamento do ar-condicionado.....	97
Tabela 10 - Orçamento geral	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Manutenção preventiva da ROMI D600	46
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Alternating Current</i>
BEP	Barramento de Equipotencialização
BTU/h	<i>British Thermal Unit per hour</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DC	<i>Direct Current</i>
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i>
EPR	Etileno Propileno
FCA	Fator de Correção de Agrupamento
FCT	Fator de Correção de Temperatura
I/O	<i>Input/Output</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IOPES	Instituto de Obras Públicas do Espírito Santo
MPS	Medidas de Proteção Contra Surtos
NBR	Norma Brasileira
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PROFINET	<i>Process Field Net</i>
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
PVC	Policloreto de Vinila
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SMD	<i>Surface Mount Devices</i>
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
TRIAC	Triodo de Corrente Alternada
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
XLPE	Polietileno Reticulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Máquinas de usinagem CNC	19
2.1.1	Processos de Usinagem	19
2.1.2	Sistema CNC	20
2.1.3	Máquinas de Centro de Usinagem CNC	21
2.2	Placas de circuito impresso	22
2.3	Principais causas de falhas em módulos eletrônicos	23
2.3.1	Corrosão de componentes eletrônicos	24
2.3.2	Descargas Eletrostáticas	24
2.3.3	Temperatura elevada	25
2.3.4	Surtos de tensão e ruídos de rede	26
2.3.5	Efeitos eletromagnéticos	27
2.4	Dimensionamento de condutores elétricos	27
2.4.1	Critério da capacidade de condução de corrente (Ampacidade)	28
2.4.2	Limites e cálculo da queda de tensão	31
2.5	Dimensionamento de disjuntores termomagnéticos	32
2.5.1	Cálculo da corrente nominal do disjuntor	33
2.5.2	Cálculo da corrente de curto-circuito	34
2.6	Medidas de proteção contra surtos elétricos	36
2.7	Pressão de vapor, temperatura e umidade do ar	38
2.7.1	Pressão total e parcial do ar	38

2.7.2	Pressão de vapor d'água	39
2.7.3	Umidade relativa e absoluta	40
2.7.4	Temperatura de ponto de orvalho	41
3	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO.....	44
3.1	Processo de Investigação	44
3.1.1	Coleta de informações inicial	44
3.1.2	Condições ambientais e operacionais da ROMI D600.....	45
3.1.3	Módulos eletrônicos e módulo de potência	46
3.1.4	Medições no interior do painel elétrico	48
3.1.5	Verificação do dimensionamento dos condutores elétricos e dispositivos de proteção	51
3.1.6	Análise da proteção contra descargas atmosféricas e sobretensões	52
4	RESULTADOS E ANÁLISES	55
4.1	Resultados e análises da coleta de informações inicial	55
4.2	Análise das condições ambientais externas e internas ao painel elétrico.....	55
4.3	Análise dos problemas nos módulos eletrônicos e módulo de potência	61
4.4	Análise do projeto de SPDA.....	62
4.5	Análise do dimensionamento dos condutores e dispositivos de proteção	64
4.6	Medições com o <i>datalogger</i>	67
5	CONCLUSÕES	77
5.1	Soluções Propostas	77
5.2	Dimensionamento do ar-condicionado para painel elétrico	79
5.3	Conclusões Finais	82
6	TRABALHOS FUTUROS.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DE AR-CONDICIONADO ATRAVÉS DO ALGORITMO DA EMPRESA KOOLTRONIC	87

APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DE AR-CONDICIONADO ATRAVÉS DO ALGORITMO DA EMPRESA HELMO.....	95
APÊNDICE C – ORÇAMENTO	97
APÊNDICE D – DESENHOS DE INSTALAÇÃO DO AR-CONDICIONADO.....	99

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da jornada de uma empresa é ideal que haja sempre uma busca pela melhoria de suas soluções e da qualidade de seus produtos ou serviços. Para tal, por muitas vezes se faz necessário adaptações e/ou modificações de equipamentos, máquinas e estruturas, surgindo a necessidade de produção de peças específicas com uma elevada precisão nas suas dimensões e detalhes, diferentes das existentes em estoque, proporcionando uma evolução na qualidade do produto ou serviço, tornando assim a empresa cada vez mais competitiva no mercado e eventualmente aumentando sua demanda, lucro e satisfação dos clientes. No caso de empresas que possuam equipamentos descontinuados, mas que ainda atendam às necessidades requeridas, por vezes, ao invés das suas substituições por novas máquinas, se torna viável a confecção de peças de reposição não mais contidas no mercado para dar continuidade a operação.

Uma vez que seja necessária a produção de peças com características únicas, surgem as fábricas de usinagem mecânica. Essas fábricas produzem as peças conforme desenho fornecido pelo cliente contendo as folgas e dimensões milimetricamente pré-definidas, utilizando-se de processos de desbaste mecânico, dando forma à peça solicitada a partir de uma matéria-prima, usualmente chamada na indústria de matéria bruta, como o aço, cobre e alumínio. Na prática os serviços de fabricação de peças conforme desenho significa submeter um material bruto à ação de uma máquina ou ferramenta, para ser trabalhado. Existem vários processos de serviços de usinagem como o aplainamento, torneamento, fresamento, furação, entre outros. Os serviços de usinagem estão presentes em diversas indústrias, como os das áreas automotiva, naval, aeroespacial, eletrônica e de eletrodomésticos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Antes de surgirem as máquinas de usinagem com maior tecnologia envolvida, a usinagem era feita através da forma convencional, isto é, as máquinas eram operadas necessariamente pelo ser humano, sem grandes automatizações ou auxílios computacionais. Com isso, diversas máquinas eram requisitadas no processo de usinagem de uma peça, sendo as principais: fresadoras, tornos, furadeiras, plainas e retíficas. Apesar de atingir resultados satisfatórios, o grande problema encontrado nesse tipo de usinagem é o seu longo tempo de produção até a finalização da peça, limitando assim o número total de produtos gerados em um intervalo de tempo (REBEYKA, 2008).

Com o avanço da automatização e da eletrônica foram criadas as máquinas de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado). Esse tipo de máquina realiza a usinagem de peças de forma automática, ou seja, sem a necessidade da atuação do ser humano durante sua produção. A peça a ser elaborada pela máquina CNC é feita através de programas de computador, normalmente *softwares* CAD (*Computer Aided Design*), onde as dimensões e cortes das peças são especificados. A partir do desenho CAD, uma série de dados são gerados e transferidos para a máquina de forma que as informações inseridas realizam o controle das diversas ferramentas presentes na máquina fazendo todo o trabalho de usinagem de forma automática (ROCHA, 2016).

Juntamente com a evolução da automação e com a inserção de equipamentos elétricos e eletrônicos para realização da programação numérica do CNC, controle dos eixos de movimento e das ferramentas da máquina, vêm também os problemas relativos à operacionalidade desses equipamentos. Componentes eletrônicos de baixa potência podem ser bem sensíveis a diversos fatores como os de variação de tensão, sobrecorrente, temperatura, umidade, etc., onde por vezes a danificação de apenas um componente pode comprometer o funcionamento de toda a máquina, gerando custos elevados, perda de produção e até mesmo problemas com o cliente devido a atrasos na entrega.

Tendo em vista que os problemas relacionados aos componentes eletrônicos podem ter diversas origens dentro de um ambiente fabril, uma investigação mais a fundo e detalhada das condições operacionais e do ambiente operacional se faz necessária para que possa ser indicada a origem dos problemas e dessa forma propor uma solução efetiva.

Em uma fábrica de usinagem de peças mecânicas foram relatados problemas quanto a queima de módulos eletrônicos em uma máquina de centro de usinagem CNC, a qual possui uma grande variedade de ferramentas, realizando as funções de diversas máquinas de usinagem em apenas uma. Também foi informado que frequentemente não se consegue partir a máquina a frio, isto é, no início da operação, após repouso da máquina durante a noite. Além disso, segundo o proprietário, em dias mais quentes, como no verão, ocorre a parada da máquina durante a operação, permanecendo assim por horas. Motivado por esses fatos, este Projeto de Graduação tem por intuito a investigação das causas dos problemas mencionados. Adicionalmente é realizada uma proposta de solução viável, de acordo as análises feitas, buscando o menor custo-benefício possível.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do projeto é o de investigar as causas de problemas relatados sobre uma máquina CNC da empresa ROMI, modelo D600, através de vistorias, análises e medições e então propor a solução mais viável e econômica para o proprietário de acordo com a estrutura da empresa.

1.1.2 Objetivos Específicos

Com o objetivo de identificar e propor uma solução para os problemas operacionais da máquina em estudo, são apresentados os principais objetivos específicos do trabalho:

- Investigar as condições ambientais de operação;
- Verificar a existência de um projeto de sistema de aterramento e de SPDA e se está compatível com as normas vigentes;
- Realizar o dimensionamento dos cabos e dispositivos de proteção do circuito de alimentação da máquina através de *software* adequado;
- Investigar as condições internas de operação do painel elétrico da máquina;
- Realizar medições de temperatura e umidade no interior do painel elétrico;
- Analisar os resultados obtidos nas etapas anteriores;
- Elaborar uma proposta de solução financeiramente viável;
- Preparar orçamento da solução proposta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Máquinas de usinagem CNC

2.1.1 Processos de Usinagem

Estão inseridos no processo de usinagem as operações que realizam as ações que geram formas, dimensões e acabamentos de uma peça, produzindo cavaco, o qual é um material de forma irregular retirado pelas ferramentas das máquinas de usinagem a partir do desbaste mecânico realizado em uma matéria-prima, por exemplo, metálica (FERRARESI, 1970). A usinagem é realizada a partir do movimento entre a ferramenta e a peça, sendo normalmente executado pela ferramenta, possibilitando uma padronização dos movimentos referenciando-se na peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo FERRARESI (1970), dentre os principais processos de usinagem, temos:

- *Torneamento*: consiste em um processo para fabricação de peças cilíndricas, na qual as ferramentas do maquinário realizam um deslocamento retilíneo ou curvilíneo, enquanto a peça gira em torno do eixo principal. O deslocamento da ferramenta que realiza o desbaste mecânico pode ter uma trajetória paralela, inclinada, perpendicular ou radial em relação ao eixo principal, visando a obtenção de uma forma pré-definida.
- *Aplainamento*: pode ser horizontal ou vertical com movimento retilíneo da peça ou da ferramenta. Sua função é a de gerar superfícies planas e curvas através de uma aresta cortante que retira material da superfície da peça.
- *Furação*: na maioria das vezes cilíndrico, com o auxílio de uma ferramenta multicortante, as peças são perfuradas coincidentemente ou paralelamente ao eixo principal da máquina através de um movimento de rotação de uma broca ou ferramenta especial. Os furos podem ser: de remoção total ao volume do material em forma de cavaco; de remoção de material de uma peça previamente furada; furos com diferentes diâmetros ao longo da perfuração. A remoção de material também pode ser parcial, não sendo, dessa forma, a peça perfurada completamente.
- *Alargamento*: através de uma ferramenta cortante, as furações realizadas no processo de furação são alargadas com um deslocamento retilíneo e girante por parte da peça ou ferramenta. Podem ser alargamentos de desbaste ou de acabamento.

- *Rebaixamento*: com o mesmo movimento que o de alargamento, tem como intuito diferenciar a extremidade externa da peça com relação a furação, realizando o seu rebaixamento, para por exemplo, posicionar a cabeça de um parafuso de forma que o mesmo não fique exposto na superfície da peça.
- *Mandrilamento*: uma ou mais ferramentas de barra que giram são inseridas verticalmente aos furos, aumentando e ajustando os diâmetros, assim melhorando a qualidade de um furo existente para que sirva perfeitamente em um encaixe. Podem ser cilíndricas, radiais, cônicas ou de superfícies especiais.
- *Fresamento*: é o processo mecânico de usinagem utilizado para se obter uma superfície qualquer em uma peça através do movimento de giro da ferramenta juntamente com o deslocamento em uma trajetória definida com a peça.

Além dos processos descritos acima, também fazem parte da usinagem a lapidação, espelhamento, polimento, lixamento, jateamento, afiação, denteamento, dentre outros. Os procedimentos listados anteriormente podem ser realizados por máquinas específicas como tornos mecânicos, mandriladoras horizontais, retíficas cilíndricas, fresadoras etc., sendo seu manuseio manual pelo operador ou possuindo um sistema CNC. Já os centros de usinagem possuem grande parte dessas etapas de confecção de peças usinadas integradas em suas ferramentas.

2.1.2 Sistema CNC

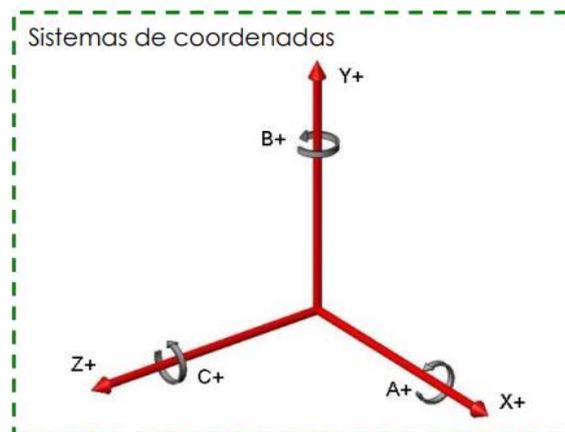
O sistema CNC consiste em um controle numérico automático das máquinas, no caso em questão, das máquinas de usinagem, através de informações numéricas ou alfanuméricas sequenciadas em um programa (ROCHA, 2016).

É usual que o modelo das peças a serem produzidas seja realizado em algum *software* CAD visto a sua grande facilidade em se projetar desenhos com dimensões exatas. Esses desenhos então podem ser transformados de forma automática em um programa sequenciado para o controlador CNC através do sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*), o qual gera uma sequência numérica a partir do desenho fornecido pelo cliente. É evidente que essas conversões automáticas tornam o processo bem mais simples e prático do que em uma programação ou produção manual (ROCHA, 2016).

2.1.3 Máquinas de Centro de Usinagem CNC

Com a automatização do processo de produção de peças a partir de um controlador CNC, as diversas máquinas usadas na usinagem puderam ter esse tipo de controlador integrado em seu processo, inclusive as máquinas de centro de usinagem. A usinagem nessas máquinas é feita por eixos mecânicos que realizam os movimentos relativos entre ferramenta e peça a partir de um código, o qual dispara sinais de acionamento através de módulos de saída de campo e recebe sinais gerados em módulos de entrada, executando os trabalhos de usinagem de forma automática sem a necessidade da intervenção humana durante a produção. Os eixos são coincidentes com os do sistema de coordenadas cartesianas X, Y e Z, podendo ser adicionadas de até três eixos de rotação A, B e C (REBEYKA, 2008), conforme Figura 1.

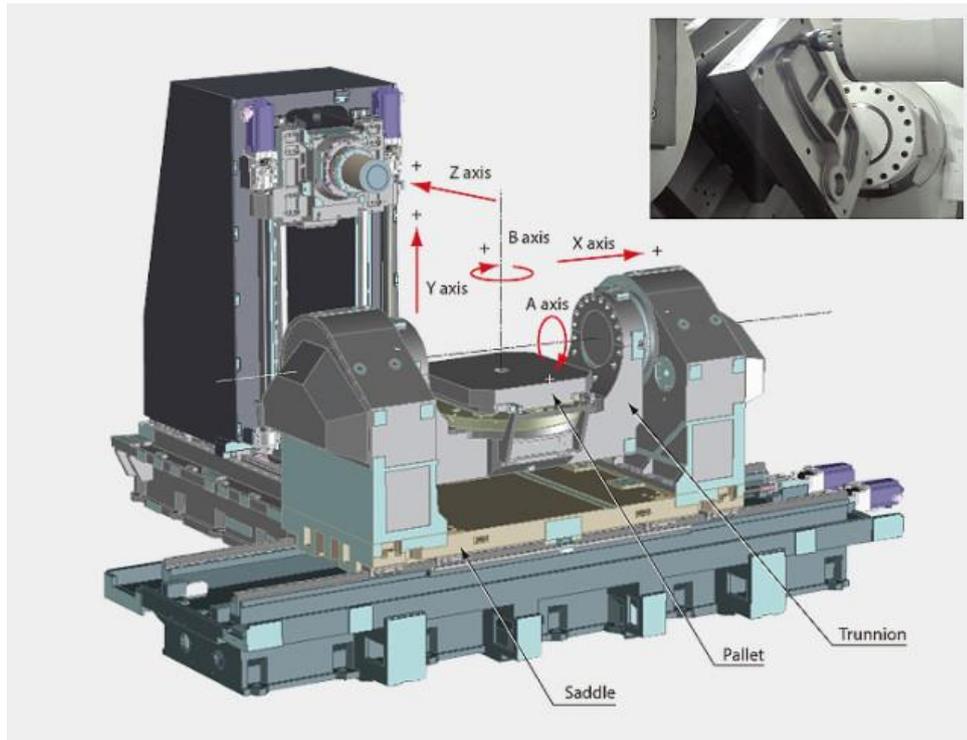
Figura 1 – Eixos das máquinas de centro de usinagem



Fonte: Rebeyka (2008).

Os centros de usinagem CNC são amplamente utilizados em fábricas de peças devido a sua versatilidade de produção e funções, sem a necessidade de alteração ou troca de peças e ferramentas de trabalho durante a produção. Outra vantagem é o fato desse maquinário suprir a necessidade de produção de peças em grande escala em pouco tempo de forma automatizada e com alta precisão. A Figura 2 apresenta um centro de usinagem contendo 5 eixos, sendo dois deles de rotação

Figura 2 – Máquina de centro de usinagem com 5 eixos



Fonte: M&S Industrial¹.

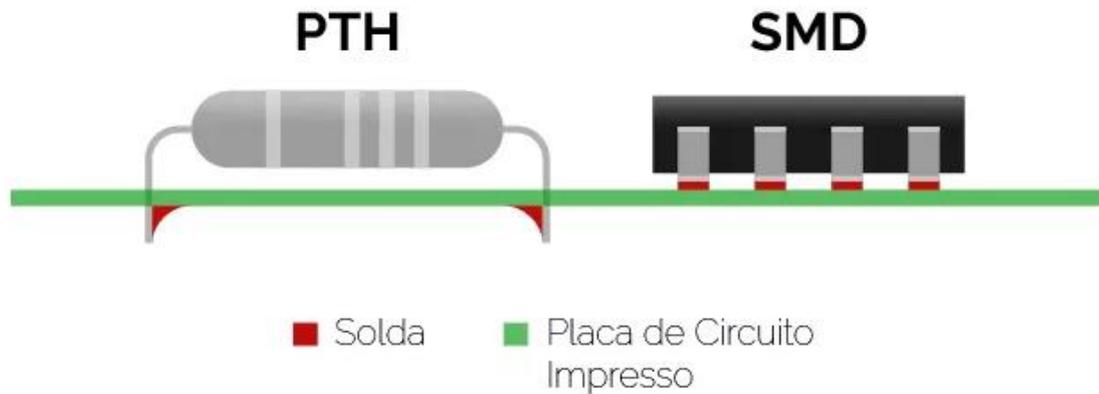
2.2 Placas de circuito impresso

As montagens de placas eletrônicas são classificadas em dois tipos, sendo elas a PTH (*Pin Through Hole*) e a SMD (*Surface Mount Devices*). A montagem mais antiga é a PTH, na qual os componentes eletrônicos possuem a passagem de seus terminais de contato por orifícios em PCIs (Placas de Circuito Impresso), constituídas de materiais condutores, onde é realizada soldagem com solda de estanho para fixação e conexão dos componentes com a trilha condutora. A solda de estanho, também denominada solda branca é, na verdade, constituída de uma liga de estanho e chumbo (60% de estanho e 40% de chumbo para uso em eletroeletrônica).

Com o surgimento e avanço de dispositivos SMD o processo de fixação de componentes em PCIs pôde ser automatizado com o uso de máquinas específicas na fabricação de placas eletrônicas, realizando a solda na superfície da placa sem a necessidade de furos, através de um sistema robotizado e preciso, possuindo técnicas de soldagem rápida e eficiente (MEHL, 2011). A comparação entre os dois tipos de montagem dos componentes em placas eletrônicas é apresentada na Figura 3.

¹ Disponível em: <<https://mesindustrial.com.br/centro-de-usinagem>>. Acesso em: 27 abr. 2021.

Figura 3 – Comparação entre as montagens PTH e SMD



Fonte: Falcon Indústria Eletrônica SC².

A montagem com componentes SMD, por possuir uma maior tecnologia envolvida, apresenta uma série de benefícios em relação ao seu antecessor PTH. A principal característica de circuitos com montagem SMD é a sua redução de espaços da placa ou módulo eletrônico, podendo reduzir o tamanho de equipamentos como computadores, celulares, máquinas, entre outros, devido a miniaturização dos componentes, tais como resistores, transistores e circuitos integrados. Além disso, esse tipo de montagem também apresenta uma maior confiabilidade a longo prazo, são menos susceptíveis a captação de ruídos, a interferências eletromagnéticas e de rádio frequência, sendo sua fabricação mais fácil e com um custo menor (WIERZBINSKI, 1999).

Apesar das vantagens apresentadas, as placas de circuito impresso com dispositivos SMD possuem uma manutenção e uma identificação de problemas muito mais complexa do que as tradicionais, além de que, por possuírem uma área de superfície menor, os componentes eletrônicos soldados na superfície da placa possuem uma troca térmica menos eficiente do que nas placas PTH, apresentando assim maior propensão a defeitos em altas temperaturas de operação (WIERZBINSKI, 1999).

2.3 Principais causas de falhas em módulos eletrônicos

² Disponível em: <<https://falconeletronica.com.br/o-que-sao-ptth-smd-e-quando-usar-cada-um>>. Acesso em: 27 abr. 2021

2.3.1 Corrosão de componentes eletrônicos

A corrosão em módulos eletrônicos é um problema que causa um prejuízo de bilhões de dólares ao redor do mundo. Na medida que os componentes eletrônicos se tornam cada vez menores, as distâncias entre os contatos elétricos também diminuem, podendo haver falhas causadas por pequenas quantidades de corrosão formadas entre os contatos (VIMALA; NATESAN; RAJENDRAN, 2009).

Alguns dos fatores que influenciam na corrosão, segundo Vimala et al. (2009), são:

- *Presença de contaminantes*: contaminantes como as causadas por elementos iônicos durante sua fabricação devido a uma limpeza incompleta pelo fabricante;
- *Manuseio da placa*: podem ocorrer a contaminação por contato humano em virtude do manuseio da placa durante a instalação ou manutenção devido a oleosidade, sujeira etc. presentes na pele;
- *Umidade*: o revestimento da placa e dos componentes da PCI absorve a umidade do ambiente em que eles estão inseridos. O aumento da umidade relativa pode permitir que haja condução iônica nas camadas da placa, o que gera uma aceleração no processo de corrosão.
- *Contaminantes suspensos no ar*: ocorre devido a substâncias dissolvidas na umidade como o cloreto de sódio, poeira e fibras, assim como gases presentes em atmosferas industriais como o sulfeto de hidrogênio e dióxido de enxofre.

2.3.2 Descargas Eletrostáticas

As descargas eletrostáticas resultam da transferência de carga entre dois corpos que possuem potenciais elétricos diferentes, resultante do desequilíbrio de cargas entre dois corpos distintos, principalmente daqueles que possuem grande resistência elétrica superficial, transferindo cargas para outro objeto ou para a terra. (ARAUJO; QUOIRIN; ARDJOMAND, 2004).

Descargas eletrostáticas se caracterizam por ocorrer em um curto tempo, na faixa de nanosegundos, formando um pequeno arco elétrico. Pela sua velocidade de propagação ser extremamente curta e devido a maioria das descargas serem de intensidade relativamente baixa, esse efeito costuma ocorrer sem que seja notado. Por se tratar do surgimento de tensões de até

35 kV e de uma corrente muito pequena, da ordem de poucos miliamperes, essas descargas não são prejudiciais aos seres humanos. Contudo, tratando-se de circuitos microeletrônicos cada vez mais sensíveis, descargas com menores tensões podem se tornar extremamente prejudiciais, causando problemas em equipamentos e com isso falhas operacionais (ARAUJO; QUOIRIN; ARDJOMAND, 2004).

A Tabela 1 mostra a sensibilidade à ESD (*Electrostatic Discharge*) de alguns componentes eletrônicos.

Tabela 1 – Sensibilidade de componentes eletrônicos à ESD

Tipo de dispositivo	Sensibilidade à ESD (Volts)
Vmos	30 - 1200
Mosfet, GaAsfet, Eprom	100 - 300
JFET	150 - 7000
Op-Amp	190 - 2500
Diodo Schottky	300 - 2500
Resistor de filme	300 – 3000
Schottky TTL	1000 – 2500

Fonte: Ribeiro (2007).

Alguns exemplos do potencial elétrico criado no corpo humano em atividades comuns são:

- Caminhar sobre carpete: de 1,5 kV a 35 kV;
- Caminhar sobre piso de vinil: 250 V a 12 kV;
- Trabalhar em uma mesa: de 100 V a 6 kV;
- Levantar-se de uma cadeira com espuma de poliuretano: de 1,5 kV a 18 kV;
- Pegar um saco de polietileno: de 1,2 kV a 20 kV.

2.3.3 Temperatura elevada

Componentes eletrônicos produzem calor em operação normal devido à corrente elétrica que passa por eles, uma vez que parte da energia elétrica é dissipada em forma de calor. O calor dissipado nos componentes tende a causar danos se exceder ao especificado pelo fabricante, reduzindo o tempo de vida útil, a confiabilidade e a operacionalidade do semicondutor (FALCÃO, 2014). Alguns fatores que podem causar a elevação da temperatura dos

componentes são o excesso de sujeira, sobrecorrentes e altas temperaturas do meio onde o módulo está inserido.

O aumento da temperatura pode dar origem a mudanças tanto mecânicas, quanto alterações no desempenho elétrico das PCIs de um módulo eletrônico. A taxa de falhas de um componente aumenta exponencialmente com o aumento de temperatura, causando graves problemas operacionais (FERNANDES; SILVA, 2013).

A temperatura dos componentes eletrônicos está relacionada aos efeitos relativos aos fenômenos de transmissão de calor através dos processos de condução, convecção e radiação. A condução é causada pela passagem de corrente elétrica pelos componentes, gerando calor por efeito Joule. A transferência de temperatura por radiação ocorre como resultado da emissão de ondas eletromagnéticas, uma vez que corpos que se encontram em temperaturas acima de zero absoluto emitem radiação. Já a convecção é o processo de transferência de calor que ocorre por meio da movimentação entre partes macroscópicas de fluidos quentes e frios, como por exemplo a água e o ar atmosférico, podendo ser natural ou forçada. (REMSBURG, 2001). Um equipamento de refrigeração, por exemplo, instalado em um gabinete fechado contendo módulos que dissipem calor gera correntes de convecção, criadas pela diferença de densidade entre o ar quente e o ar frio que o aparelho fornece, fazendo com que o ar circule realizando troca térmica com as superfícies.

2.3.4 Surtos de tensão e ruídos de rede

Um surto de tensão trata-se de um pico de tensão transiente, podendo ser proveniente de várias causas, sendo as mais frequentes as descargas atmosféricas e as partidas e paradas de máquinas de elevada potência. O equipamento pode ficar irreparavelmente danificado em caso de um surto de tensão momentânea potente. Devido a sensibilidade dos componentes eletrônicos, variações excessivas de corrente e tensão se tornam um grande problema.

Os surtos de tensão resultantes de descargas atmosféricas são causados principalmente pela incidência de raios na rede elétrica, gerando correntes e tensões muito elevadas. Caso não haja proteção adequada, podem causar incêndios e danos parciais ou completos em equipamentos elétricos e eletrônicos. Podem inclusive causar acidentes caso haja uma pessoa próxima ou segurando um aparelho eletrônico no momento da sobretensão, por exemplo. Com isso,

Medidas de Proteção contra Surtos (MPS) podem ser realizadas com o objetivo de se evitar que nos terminais dos equipamentos eletroeletrônicos apareça uma diferença de tensão maior do que eles podem suportar.

Os harmônicos da rede também são grandes responsáveis pelas paradas de máquinas que contém processadores, pois estes harmônicos podem introduzir ruídos elétricos que interferem no funcionamento de tais dispositivos e assim causando falhas intermitentes, difíceis de detectar.

2.3.5 Efeitos eletromagnéticos

Os efeitos eletromagnéticos podem afetar componentes eletrônicos causando sua queima e também ocasionar diversos tipos de falhas entre dispositivos e equipamentos, como por exemplo, a comunicação entre um módulo eletrônico e o controlador ou computador. Esse fato pode ocasionar a emissão de alarmes, atuação de relés etc. sem motivos aparentes, fazendo com que seja difícil identificar a sua origem. Os efeitos eletromagnéticos podem ser gerados por causas naturais como descargas atmosféricas ou artificiais como as geradas por circuitos eletrônicos, fontes chaveadas e motores elétricos. Capacitores, por exemplo, podem ficar sujeitos a picos de tensão maiores do que os especificados para sua operação, causando degradação do seu material dielétrico e podendo ter como consequência a sua queima. (CASSIOLATO, [20--]).

2.4 Dimensionamento de condutores elétricos

Os procedimentos para instalações elétricas são normatizados pela NBR 5410 com o intuito de promover uma operação segura, evitando sobrecorrentes, sobrecargas, curto-circuitos e outros problemas relacionados ao um projeto mal elaborado. O dimensionamento dos condutores elétricos deve permitir a passagem de corrente elétrica sem que haja o seu aquecimento além dos limites suportados pelos cabos, comprometendo sua isolação podendo implicar em operação inadequada e causando incêndios. (MAMEDE, 2017).

Uma queda de tensão excessiva até os circuitos terminais, originada pelo aumento da resistência elétrica dos condutores que é proporcional ao comprimento do cabo até a carga, é outro problema, causando subtensões de operação, provocando perda de potência e riscos de danos

em máquinas. Em motores, para manter o conjugado necessário requisitado pela carga, a corrente absorvida da rede aumenta, assim como as perdas por efeito Joule no estator e rotor, conseqüentemente aumentando a temperatura de operação e afetando a vida útil do isolamento (SILVA M. 2009). Para a correta operação, o dimensionamento dos condutores deve então ser realizado atendendo os critérios de capacidade de condução de corrente (ampacidade) e os limites de queda de tensão estabelecidos pela NBR 5410.

2.4.1 Critério da capacidade de condução de corrente (Ampacidade)

A passagem de corrente elétrica pelos condutores em função da sua resistividade faz com que o condutor produza uma quantidade de calor devido a lei de Joule, elevando a temperatura do condutor elétrico. O cabo então deve ser dimensionado para que não atinja valores de temperatura maiores do que possa suportar (CAVALIN, 2006). Para isso uma série de fatores devem ser levantados sobre o cabo e a sua operacionalidade de forma que possa ser estimada a corrente que circulará neles, podendo assim se escolher o cabo que atenda a carga de forma segura.

A máxima corrente admissível para cabos elétricos varia conforme o seu tipo de isolamento, que por sua vez determina os valores que o condutor pode ser submetido em regime contínuo, em sobrecarga e em curto-circuito. Os materiais isolantes mais comuns utilizados em instalações elétricas são os de PVC (Policloreto de Vinila), EPR (Etileno Propileno) e XLPE (Polietileno Reticulado), sendo o de PVC o mais usado, porém menos tolerante a elevadas temperaturas. Os dados sobre a capacidade de condução elétrica de acordo com a espessura do cabo e a sua isolamento são fornecidos pelos fabricantes de cabos elétricos.

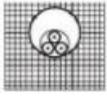
De acordo com a norma NBR 5410 a forma como os condutores são instalados também exerce influência quanto a capacidade de condução de corrente devido a questões térmicas relacionadas ao ambiente e a quantidade de cabos e circuitos instalados em um mesmo eletroduto, calha, bandeja etc. A norma associa cada método de instalação com algum dos métodos de referência indicados pela IEC 60364-5-52, os quais estão listados abaixo e são representados pelas letras e números que as precedem.

- A1: condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;

- A2: cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;
- B1: condutores isolados em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira;
- B2: cabo multipolar em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira;
- C: cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede de madeira;
- D: cabo multipolar em eletroduto enterrado no solo;
- E: cabo multipolar ao ar livre;
- F: cabos unipolares justapostos (na horizontal, na vertical ou em trifólio³) ao ar livre;
- G: cabos unipolares espaçados ao ar livre.

Alguns dos principais métodos de instalação de cabos e a sua relação com os métodos de referência estão mostrados na Figura 4.

Figura 4 – Exemplos da relação entre métodos de instalação e métodos de referência

Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Método de referência
7		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria	B1
8		Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria	B2
11		Cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do cabo	C
12		Cabos unipolares ou cabo multipolar em bandeja não perfurada, perfilado ou prateleira	C

Fonte: SIL Fios e Cabos Elétricos⁴.

A capacidade de condução dos condutores também está relacionada com o número de condutores eletricamente carregados do circuito a ser dimensionado. Por norma, as fases e o

³ Trifólio refere-se a forma geométrica formada pela disposição de três cabos justapostos formando três círculos sobrepostos.

⁴ Disponível em: <https://www.sil.com.br/pt/eletricista/tabelas.aspx>. Acesso em: 19 set. 2021.

neutro são considerados como condutores carregados, ou seja, considera-se como havendo dois condutores eletricamente carregados para os circuitos monofásicos e os com duas fases, sem neutro, e como três condutores carregados para os circuitos com duas fases e neutro e os trifásicos.

As informações sobre as propriedades dos cabos e as condições e métodos de instalação dos condutores até aqui mencionados são utilizados para a escolha dos condutores que atendam a corrente corrigida I_c a partir da corrente de projeto I_p . A corrente de projeto ou corrente nominal no escopo desse projeto será trifásica e equilibrada (três fases sem neutro) dadas pela equação (1).

$$I_p = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot v \cdot \cos\varphi \cdot \eta} \quad (1)$$

Onde:

I_p – Corrente de projeto;

P_n – Potência nominal trifásica da carga;

v – Tensão de linha de alimentação;

$\cos\varphi$ – Fator de potência;

η – Rendimento.

Para calcular a corrente corrigida, alguns fatores de ajuste devem ser feitos na corrente de projeto de forma a considerar as trocas de calor atuantes nos cabos durante a operação, assim estabelecendo a corrente que os condutores devem suportar para operar em condições seguras de temperatura. Esses fatores de correção são o Fator de Correção de Temperatura (FCT) e o Fator de Correção de Agrupamento (FCA) e são relacionados com a corrente de projeto pela equação (2).

$$I_c = \frac{I_p}{FCA \cdot FCT} \quad (2)$$

O FCT é utilizado para ajustar a corrente de acordo com a temperatura do ambiente, sendo considerado o valor unitário para ambientes na temperatura de 30 °C. A variação do FCT de acordo com a temperatura é observada na Tabela 2. O FCA faz referência ao número de circuitos instalados em um mesmo eletroduto, calha, bandeja ou em outra forma de instalação,

fazendo um ajuste relativo à troca de calor proveniente de condutores carregados de outros circuitos. A NBR 5410 fornece valores de FCA considerando que todos os condutores vivos estão permanentemente carregados com 100% da sua capacidade, como definido na Tabela 3, mas possibilitando a desconsideração dos circuitos que possuam a corrente de projeto inferior a 30% da capacidade do condutor.

Tabela 2 – Fatores de correção de temperatura

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71

Fonte: ABNT:NBR 5410.

Tabela 3 – Fatores de correção de agrupamento

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Fonte: ABNT:NBR 5410.

2.4.2 Limites e cálculo da queda de tensão

Os limites de queda de tensão conforme NBR 5410 são:

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador, no caso de transformador de propriedade da(s) unidade(s) consumidora(s);

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for aí localizado;
- 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio;
- Em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4%.

A queda de tensão para efeito de dimensionamento dos fios e cabos é adotada como a queda de tensão permitida dos circuitos terminais, partindo dos quadros de distribuição. Por norma a queda deve ser menor ou igual a 4%.

O cálculo é realizado de acordo com as seguintes fórmulas para a queda de tensão estimada no percurso:

$$\Delta V = I_p \cdot r \cdot l \quad (3)$$

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V \cdot 100}{v} \quad (4)$$

Onde:

ΔV - Queda de tensão em determinado trecho de circuito (V);

I_p - Corrente nominal do circuito (A);

r - Resistência do cabo por quilômetro [dado pelo fabricante (V/A. Km)];

l - Comprimento do trecho de circuito (Km);

v - Tensão de alimentação do circuito (V);

$\Delta V(\%)$ - Queda de tensão percentual do circuito em relação a tensão de alimentação;

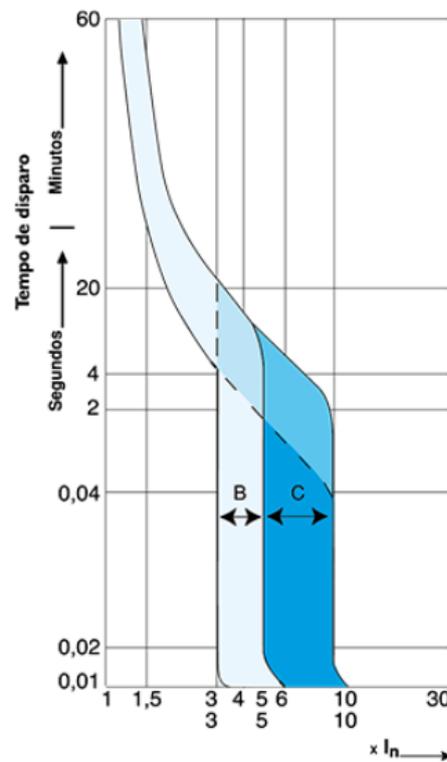
2.5 Dimensionamento de disjuntores termomagnéticos

Para realizar a proteção dos condutores contra sobrecorrentes e correntes de curto-circuito, deve ser realizado também um correto dimensionamento do disjuntor termomagnético com características de atuação que promovam tanto a operação da carga em condições nominais quanto a integridade dos cabos elétricos, impedindo que surjam os efeitos térmicos prejudiciais

aos cabos, terminais, ligações e outros circuitos próximos. Um disjuntor bem dimensionado é aquele que não atua para correntes inferiores aos que os condutores possam suportar e que seu tempo de atuação diminua conforme a intensidade da corrente aumenta, tornando-se quase que instantânea para curtos-circuitos dentro dos valores presumidos no ponto de instalação (COTRIM, 2009).

As curvas dos disjuntores variam conforme sua fabricação de forma que sua atuação seja mais rápida ou mais lenta, sendo escolhida de acordo com as cargas as quais vão alimentar, vide Figura 5 (MAMEDE, 2017). Comparativamente, a curva B possui uma atuação mais rápida do que a curva C, sendo recomendada para cargas resistivas. Para cargas indutivas, onde há um pico de corrente na sua partida, como motores de potência mediana, são amplamente utilizados disjuntores com curva de atuação C, onde a sua operação é interrompida de forma quase instantânea entre 5 a 10 vezes a corrente nominal. Se por exemplo usarmos um disjuntor com a curva B para proteção de um motor elétrico, existe a possibilidade que o disjuntor desarme na partida. Outros tipos de curva de disjuntores também existem no mercado.

Figura 5 – Curvas B e C de atuação



Fonte: WEG.

2.5.1 Cálculo da corrente nominal do disjuntor

A NBR 5410 define que a segurança dos condutores contra sobrecargas é alcançada se as inequações (5) e (6) são satisfeitas.

$$I_p \leq I_n \leq I_Z \quad (5)$$

$$I_2 \leq 1,45xI_Z \quad (6)$$

Onde:

I_p é a corrente de projeto do circuito (A);

I_n é a corrente nominal do disjuntor (A);

I_Z é a capacidade de condução dos condutores considerando os ajustes FCA e FCT, dada pela equação (7);

I_2 é a corrente convencional de atuação para disjuntores, definida pela NBR IEC 60898 pela equação (8).

$$I_Z = I_{cabo} \cdot FCA \cdot FCT \quad (7)$$

$$I_2 = 1,45xI_n \quad (8)$$

Onde I_{cabo} é a capacidade de corrente do cabo utilizado.

Caso não seja possível garantir que a temperatura limite dos condutores não se mantenha por um tempo superior a 100 horas durante 12 meses consecutivos ou por 500 horas durante a vida útil do condutor, a equação (6) deverá ser substituída pela equação (9).

$$I_2 \leq I_Z \quad (9)$$

2.5.2 Cálculo da corrente de curto-circuito

Para circuitos de baixa tensão, o cálculo pode ser simplificado considerando-se que o trecho a montante do transformador possui uma potência de curto-circuito infinita, isto é, uma impedância de curto-circuito igual a zero. Nessas condições pode-se considerar que a corrente

inicial de curto-circuito presumida é equivalente a corrente de curto permanente no secundário do transformador (COTRIM, 2009).

Com essas considerações, Cotrim (2009) fornece a equação (10), a qual permite calcular, para circuitos trifásicos 127/220 V com condutores com seção transversal de até 50 mm², a corrente de curto-circuito trifásico presumida em qualquer ponto do circuito no qual se deseja dimensionar o disjuntor.

$$I_k = \frac{12,7}{\sqrt{\frac{162}{I_{k0}^2} + \frac{52 \cdot \cos\theta_{k0} \cdot l}{I_{k0} \cdot S} + \frac{5l^2}{S^2}}} \quad (10)$$

Onde:

I_k é a corrente de curto-circuito presumida em um determinado ponto, em kA;

I_{k0} é a corrente de curto-circuito inicial, normalmente fornecida pela concessionária de energia ou calculada a partir do transformador, em kA;

S é seção transversal do condutor em mm²;

l é o comprimento do circuito até o ponto da falta, em metros;

$\cos\theta_{k0}$ é o fator de potência do curto-circuito conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Fator de potência do curto-circuito em função de I_{k0}

I_{k0} (KA)	1,5 a 3	3,1 a 4,5	4,6 a 6	6,1 a 10	10,1 a 20	Maior que 20
$\cos\theta_{k0}$	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,25

Fonte: COTRIM (2009).

Quando não for possível obter a corrente de curto-circuito com a concessionária ou diretamente do transformador de potência, a Tabela 5 pode ser utilizada.

Tabela 5 – Valores aproximados da corrente de curto-circuito no secundário de transformadores

P _n (kVA)	I _{ko} (kA)	
	220/127 V	380/220 V
15	0,8	0,4
16	0,8	0,5
25	1,2	0,7
30	1,6	0,8
45	2,4	1,2
50	2,5	1,5
63	3,1	1,8
75	3,8	2,2
80	4	2,3
100	5	3
112,5	5,6	3,2
150	7,6	4,4
160	8	4,7
200	10	6
225	11	6,5
250	12	7
300	15	9

Fonte: Eletricidade Moderna.

2.6 Medidas de proteção contra surtos elétricos

Para a proteção contra sobretensões, a NBR 5410 sugere a utilização de dispositivos de proteção nos pontos de entrada ou saída dos condutores, de forma a reduzir a intensidade das tensões provocadas por motivos tanto internos quanto externos à edificação. Essa proteção pode ser realizada por meio de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS).

A instalação de dispositivos DPS é apenas uma medida de proteção contra surtos, não cumprindo nenhuma função adicional em uma instalação elétrica. Esses dispositivos não possuem a função de estabilizar a tensão e nem filtrar as perturbações em regime permanente, sendo também bastante vulnerável às sobretensões temporárias, se danificando facilmente dependendo do número de ocorrências e das condições em que foi instalado.

As MPS (Medidas de Proteção contra Surtos) são necessárias pelo fato de surtos de tensão ou de corrente causarem inúmeros prejuízos em instalações elétricas, devido não apenas a danos a equipamentos eletroeletrônicos, mas principalmente a falhas temporárias, que interrompem processos produtivos. Por esse motivo, a implantação das MPS tem o objetivo de aumentar a confiabilidade das instalações elétricas, garantindo que elas tenham menor vulnerabilidade às descargas atmosféricas, partidas de máquina de alta potência e manobras na rede elétrica.

Com isso, para uma operação efetiva de proteção de surtos de tensão e um correto escoamento da energia gerada por esses surtos, a NBR 5419 apresenta medidas de proteção contra surtos (MPS), incluindo o projeto de aterramento equipotencializado e projetos de SPDA que é um sistema completo destinado a proteger instalações contra os efeitos das descargas atmosféricas, composto de um sistema externo e de um sistema interno de proteção. A NBR 5419 se divide em 4 partes: Princípios gerais; Gerenciamento de risco; Danos físicos a estruturas e perigo de vida; Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.

De acordo com a NBR 5419-3 (2018) o objetivo do projeto de SPDA externo é o de conduzir a corrente de possíveis descargas atmosféricas até a terra, evitando danos térmicos e mecânicos que podem gerar prejuízos e acidentes. Essa parte da norma mostra as diretrizes para reduzir danos causados a estrutura da edificação e do patrimônio interno, não realizando uma proteção direcionada para dispositivos elétricos e eletrônicos.

A parte 4 da NBR 5419 trata justamente de medidas para se evitar danos causados por descargas atmosféricas aos dispositivos eletroeletrônicos. As descargas atmosféricas possuem uma grande quantidade de energia, liberando centenas de milhões de joules. Por outro lado, pequenas quantidades de energia são suficientes para danificar e comprometer o funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis. Além disso, as descargas atmosféricas produzem impulsos eletromagnéticos que causam falhas em sistemas eletroeletrônicos, mostrando ser necessário que medidas preventivas sejam tomadas (NBR 5419-4, 2018).

Os efeitos dos campos eletromagnéticos irradiados podem ser controlados com medidas de proteção com a aplicação de blindagens, reduzindo os efeitos eletromagnéticos e ruídos elétricos. A blindagem pode ser feita diretamente nos cabos ou nos conduítes por meio de materiais metálicos como o cobre e o alumínio. Também pode ser feita a chamada blindagem espacial a qual pode ser construída em toda a estrutura da edificação a partir de barras de concreto armado e suportes metálicos. A blindagem também pode ser feita diretamente nos invólucros dos equipamentos que se deseja proteger (NBR 5419-4, 2018).

Ainda de acordo com a NBR 5419, falhas causadas pela irradiação de campos eletromagnéticos podem ser desconsideradas para os equipamentos que atendam as especificações normativas de CEM (Compatibilidade Eletromagnética) da IEC 61000, sendo normalmente nesse caso, a

utilização de DPS suficientes para proteção. No caso dos equipamentos que não atendam as normas de CEM, outras MPS devem ser consideradas.

2.7 Pressão de vapor, temperatura e umidade do ar

2.7.1 Pressão total e parcial do ar

O ar seco possui uma composição formada por uma série de elementos, porém a sua formação é quase totalmente composta por nitrogênio, oxigênio e argônio, sendo a concentração dos outros elementos muito baixa, conforme mostra a Tabela 6. Pelo fato de o ar ser uma mistura de gases ideais, ele também se comporta como um gás ideal. Dessa forma a lei dos gases ideais pode ser utilizada com a aplicação da equação (11) (MIRANDA, 2016).

$$P.V = n.R.T \quad (11)$$

Onde, neste caso:

P – Pressão total da mistura;

V – Volume de ar em análise;

n – Número total de moles da mistura;

R – Constante universal dos gases;

T – Temperatura do ar.

Tabela 6 – Composição de ar seco à temperatura de 15°C e pressão de 101325 Pa

Molécula	Símbolo	Massa molecular (g.mol ⁻¹)	% do ar seco
Nitrogênio	N ₂	28	78,084
Oxigênio	O ₂	32	20,9476
Argônio	A _r	40	0,934
Outros	-	-	0,0344

Fonte: Curso Física do Ambiente Agrícola – USP.

Nota: Adaptada pelo próprio autor.

Novamente, como se trata de uma mistura de gases ideais, pela lei de Dalton que afirma que o valor total da pressão de uma mistura de gases ideais é igual a soma da pressão parcial de cada

componente individual, podemos decompor a pressão total conforme a equação (12) (MIRANDA, 2016).

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots + P_n \quad (12)$$

Sendo assim, para qualquer constituinte i da mistura, tem-se:

$$P_i \cdot V = n_i \cdot R \cdot T \quad (13)$$

Pelas equações (11) e (13), obtém-se a equação (14), onde f_i é a fração molar do componente i .

$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} = f_i \rightarrow P_i = P f_i \quad (14)$$

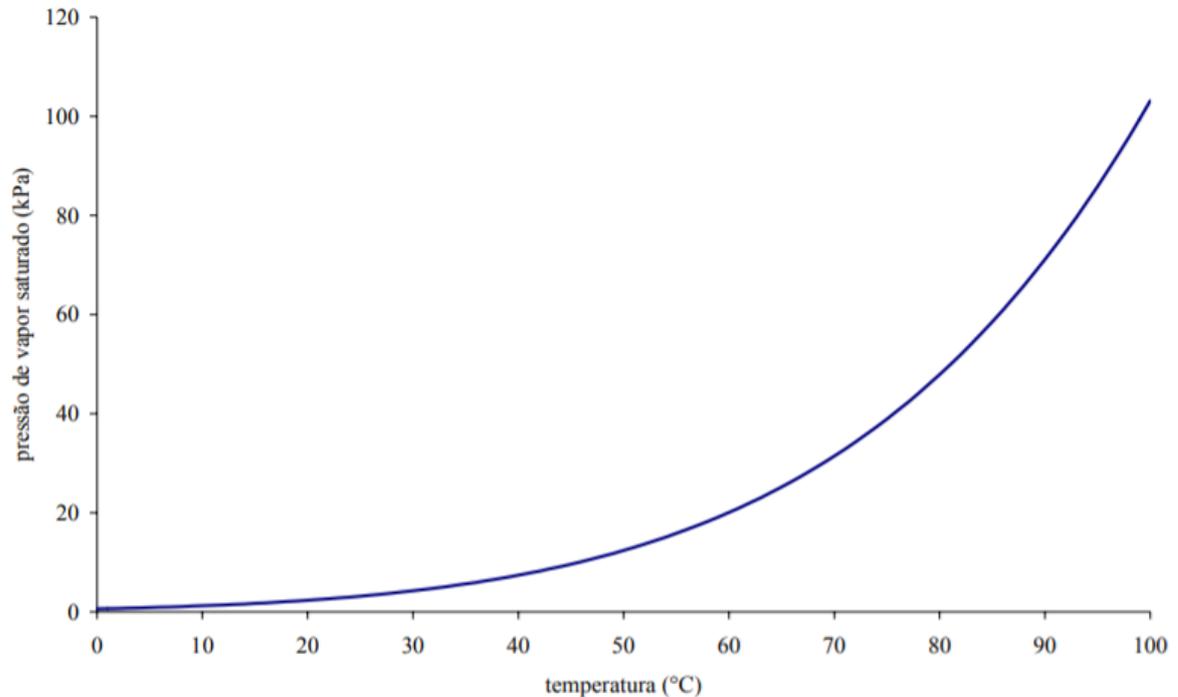
Com a equação (14) pode-se relacionar a pressão parcial de cada gás individualmente da mistura com a pressão total. O ar atmosférico, porém, não é totalmente seco, sempre contendo um teor de vapor d'água proveniente das mais variadas fontes, dependendo da região ou ambiente. A quantidade de vapor d'água presente no ar varia de zero (ar seco) até aproximadamente 4% da mistura, que é o máximo valor que o ar pode reter em seu volume sem que ocorra a condensação, podendo haver também a presença de contaminantes e partículas suspensas no ar (SILVA J. 2008).

2.7.2 Pressão de vapor d'água

Conforme visto anteriormente, a pressão do ar pode ser decomposta pela somatória da pressão dos seus gases, dessa forma existirá também uma pressão relativa ao vapor d'água e_a presente na mistura. A pressão do vapor d'água presente no ar é um indicador relacionado ao seu processo de condensação, tornando-se água no estado líquido novamente. O fenômeno de condensação do vapor d'água ocorre quando a pressão de vapor do ar atinge a pressão de vapor saturado (e_s), que varia em função da temperatura conforme a equação (15), equação de Tetens, abaixo, em quilopascal, com a temperatura T dada em graus Celsius válida para o intervalo de 0 °C até 100 °C (MIRANDA, 2016). O Gráfico 1 mostra a variação da pressão de vapor saturado em função da temperatura.

$$e_s = 610,8 \cdot \exp\left(\frac{17,3T}{237,3+T}\right) \quad (15)$$

Gráfico 1 – Relação entre a pressão de vapor saturado e temperatura dada pela equação de Tetens



Fonte: Curso Física do Ambiente Agrícola – USP.

2.7.3 Umidade relativa e absoluta

A umidade relativa (*UR*) representa a concentração de vapor d'água presente no ar atmosférico e é dada pelo quociente entre a pressão de vapor do ar e a pressão de saturação de vapor, conforme equação (16). A umidade relativa é um indicador de quão próximo o vapor está para se condensar, ou seja, quão próximo a pressão de vapor do ar está da pressão de saturação. A umidade relativa também está associada ao nível de conforto humano, sendo considerado ideal entre 40 e 70%. Quando a umidade relativa está alta, acima de 70%, a água possui mais dificuldade em evaporar, causando a sensação de calor, influenciando na transpiração do corpo humano. Já quando a umidade está baixa, menor que 40%, a água possui facilidade em evaporar, podendo causar problemas respiratórios, garganta e nariz ressecados, além de ocasionar em uma grande taxa de transpiração (MIRANDA, 2016).

$$UR = \frac{e_a}{e_s} \quad (16)$$

A umidade absoluta (UA) indica a concentração de vapor presente no ar, em g/m^3 , ou seja, a umidade absoluta é o indicador que informa de fato o quanto de água suspensa no ar em forma de vapor está presente em um determinado ambiente. Seu valor é dado pelo quociente entre a massa do vapor d'água (m_{H_2O}) e o volume de ar no qual está contido (VAREJÃO-SILVA, 2006), como segue na equação (17).

$$UA = \frac{m_{H_2O}}{V} = \frac{M_{H_2O} \cdot n_{H_2O}}{V} \quad (17)$$

Onde n_{H_2O} são o número de moles de água presente no ar e M_{H_2O} é a massa molecular da água. Pela equação (13) para o vapor d'água, tem-se:

$$\frac{n_{H_2O}}{V} = \frac{e_a}{RT} \quad (18)$$

Multiplicando ambos os lados da equação por M_{H_2O} , e considerando a equação (17) temos:

$$\frac{M_{H_2O} \cdot n_{H_2O}}{V} = \frac{e_a}{RT} M_{H_2O} \rightarrow UA = \frac{e_a}{RT} M_{H_2O} \quad (19)$$

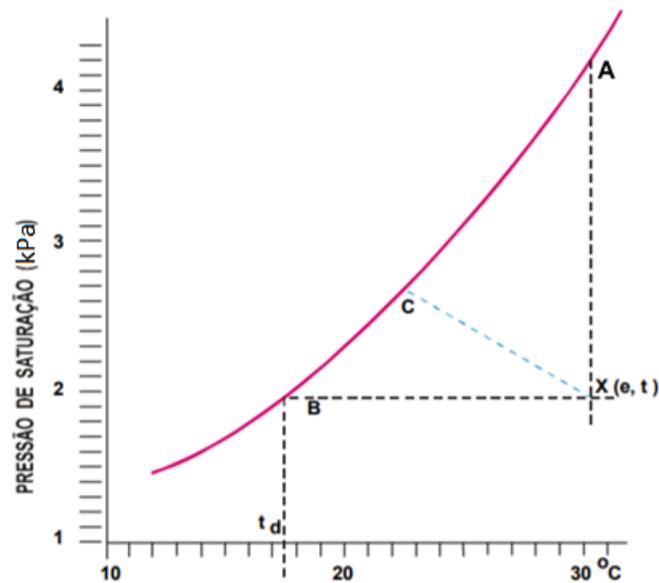
Substituindo a equação (16) na equação (19) e sabendo que a conversão da temperatura em graus Celsius para Kelvin é dada por $T = T + 273,15$ chega-se na equação (20):

$$UA = \frac{U_R \cdot e_s}{R(T+273,15)} M_{H_2O} \quad (20)$$

2.7.4 Temperatura de ponto de orvalho

A água presente no ar pode condensar-se de três formas: aumentando-se a quantidade de vapor d'água no ar mantendo-se a temperatura constante; diminuindo a temperatura do ar mantendo-se a quantidade de vapor d'água no ar constante, atingindo-se assim o ponto de orvalho; a combinação dos dois fatores. O Gráfico 2 a seguir exemplifica as três situações, conforme (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Gráfico 2 – Curva de saturação do vapor d'água versus temperatura



Fonte: Varejão-Silva, 2006.

Considerando que as condições iniciais do ar estão representadas no ponto sinalizado por $X(e, t)$, para que haja condensação de parte da água, os seguintes três casos citados estão representados pelos pontos A, B e C, conforme descrito a seguir:

- Deslocamento do ponto inicial para o ponto A: a temperatura permaneceu constante na faixa dos 30 °C e a concentração de água no ar aumentou, conseqüentemente aumentando a pressão do vapor d'água do ar até a pressão de saturação, causando a sua condensação.
- Deslocamento do ponto inicial para o ponto B (Ponto de orvalho): a quantidade de água em forma de vapor presente no ar se manteve constante, sendo um processo isobárico, mantendo um valor de pressão de aproximadamente 1,9 kPa. Com isso a temperatura de orvalho é definida pela interseção do eixo da temperatura (eixo X) com a pressão de 1,9 kPa, em aproximadamente 17,5 °C. Ao resfriar o ar até a temperatura de orvalho, graficamente, ocorre a ultrapassagem da área delimitada pela curva da pressão de saturação, dessa forma ocorrendo a condensação da água. Após ser atingida a temperatura de ponto de orvalho, um novo resfriamento irá percorrer a curva de saturação (em vermelho) ao invés do prolongamento da linha $X(e, t) - B$ (linha pontilhada na horizontal), causando uma redução da pressão de vapor do ar,

consequentemente reduzindo a quantidade de água no estado de vapor e aumentando a quantidade no estado líquido.

- Deslocamento do ponto inicial para o ponto C: com o aumento de vapor d'água presente no ar, a mistura aproxima-se da curva de saturação, aumentando dessa forma a temperatura do ponto de orvalho. Com o resfriamento da temperatura do ar a curva é atingida havendo condensação.

A temperatura de orvalho indica a temperatura em que o ar úmido deve ser resfriado para que se torne saturado, sem que haja alteração na quantidade de água contida no ar, ou seja, sem que haja aumento na sua pressão de vapor. O resfriamento do ar úmido até o a temperatura de orvalho provoca a condensação da água nas superfícies próximas (VAREJÃO-SILVA, 2006). Isso é perceptível quando algum líquido gelado entra em exposição ao ar atmosférico que está mais quente, dessa forma resfriando o ar até o ponto de orvalho e causando o surgimento de gotículas de água na superfície do recipiente que contém o líquido.

3 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

3.1 Processo de Investigação

Após ampla pesquisa sobre o funcionamento das máquinas de centro de usinagem CNC, seu comportamento e principais causas de falhas em módulos eletrônicos, pôde-se dar início ao processo de investigação com base em todo o conteúdo teórico previamente estudado.

3.1.1 Coleta de informações inicial

Para dar início ao processo de investigação foram realizadas entrevistas iniciais com os operadores e proprietários quanto aos problemas previamente relatados, apresentados por uma máquina específica de centro de usinagem, modelo ROMI D600, objeto da presente investigação, por se tratar da que está apresentando maior quantidade de problemas em relação às outras máquinas.

Após a entrevista com os funcionários e o dono da empresa, realizou-se o pedido da documentação relativa ao CNC ROMI D600, isto é, manuais, diagramas, relatórios técnicos e *check lists* de vistorias e manutenções, no intuito de entender mais a fundo o funcionamento da parte eletrônica e dos módulos da máquina, assim como as manutenções realizadas nos módulos e as causas identificadas por parte da assistência técnica contratada. A Tabela 7 abaixo mostra as informações geradas pela empresa de manutenção contratada e fornecidas pela administração.

Tabela 7 – Relatórios técnicos de manutenção

(continua)

Data de ocorrência	Módulo	Defeito/Causa	Solução
24/01/2018	Acionamento - Magazine	Queima do módulo causado pelo travamento do braço da proteção do magazine da ferramenta.	Troca do TRIAC BTA41 800B.
06/11/2018	Módulo de I/O	Curto-circuito na placa de I/O devido a poeira metálica do ambiente de trabalho.	Foi feita a limpeza da placa com “limpa contato” e deixado secar ao sol.
08/11/2018	Acionamento - Magazine	Sem movimento do avanço/recuo da trocadora de ferramentas (magazine). Foi constatada a queima do TRIAC BTA41 800B e capacitor de 8uF.	Trocado os componentes defeituosos, verificado curto-circuito ou fuga de corrente no motor, verificado cabos e demais alimentações. Foi realizada a compra de novo módulo.

Tabela 8 – Relatórios técnicos de manutenção

(conclusão)

Data de ocorrência	Módulo	Defeito/Causa	Solução
09/02/2021	Acionamento - Magazine	Módulo de acionamento queimado. Causa não informada.	Foi realizada a compra de novo módulo.
04/03/2021	Módulo de I/O	Queima do módulo. Causa não informada.	Foi realizada a compra de novo módulo.

Fonte: Administração da empresa.

Nota: Tabela produzida pelo próprio autor.

Vale ressaltar que as informações referentes ao ano de 2018 foram encontradas pelo estudante durante medições realizadas na máquina, na parte lateral do painel elétrico. Já as referentes ao ano de 2021 foram cedidas pela empresa, não tendo sido informado sobre quaisquer acontecimentos nos anos de 2019 e 2020.

3.1.2 Condições ambientais e operacionais da ROMI D600

Para garantir um melhor funcionamento e menor susceptibilidade a falhas de uma máquina industrial é necessário fazer o bom uso dela, aderindo à cuidados operacionais, garantindo a sua conservação e a de seus componentes tanto eletroeletrônicos quanto mecânicos. Por exemplo, um ambiente onde há muita presença de partículas em suspensão, umidade elevada e não há a realização de limpezas periódicas, resulta em um acúmulo de sólidos em tubulações, entradas de ar, painéis elétricos e na superfície de módulos eletrônicos, proporcionando falhas por variados fatores como os de aumento de temperatura provocado pela diminuição da eficiência de troca térmica. Quando há uma regularidade de boas práticas de limpeza no ambiente de produção, as chances de falhas dos equipamentos são reduzidas, evitando gastos com consertos frequentes.

Nessa etapa de investigação, foram então analisadas as condições ambientais nas quais a máquina está submetida externa e internamente ao painel elétrico onde os módulos eletrônicos estão instalados por meio de vistorias realizadas no período de funcionamento da máquina. Também foi verificado se as manutenções preventivas recomendadas pelo fabricante estão sendo atendidas. De acordo com o manual de manutenção da ROMI D600, recomenda-se que haja manutenção preventiva periodicamente. Os três itens de manutenção preventiva relativos ao painel elétrico são mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 - Manutenção preventiva da ROMI D600

	Período		
	Mensal	Semestral	Anual
Itens a serem inspecionados pelo operador			
Limpar filtros e ventiladores do painel elétrico			
	Período		
	Mensal	Semestral	Anual
Executar limpeza interna do painel elétrico			
Reaperto da fiação do painel elétrico			

Fonte: Manual de manutenção – ROMI.

Nota: Adaptação do próprio autor.

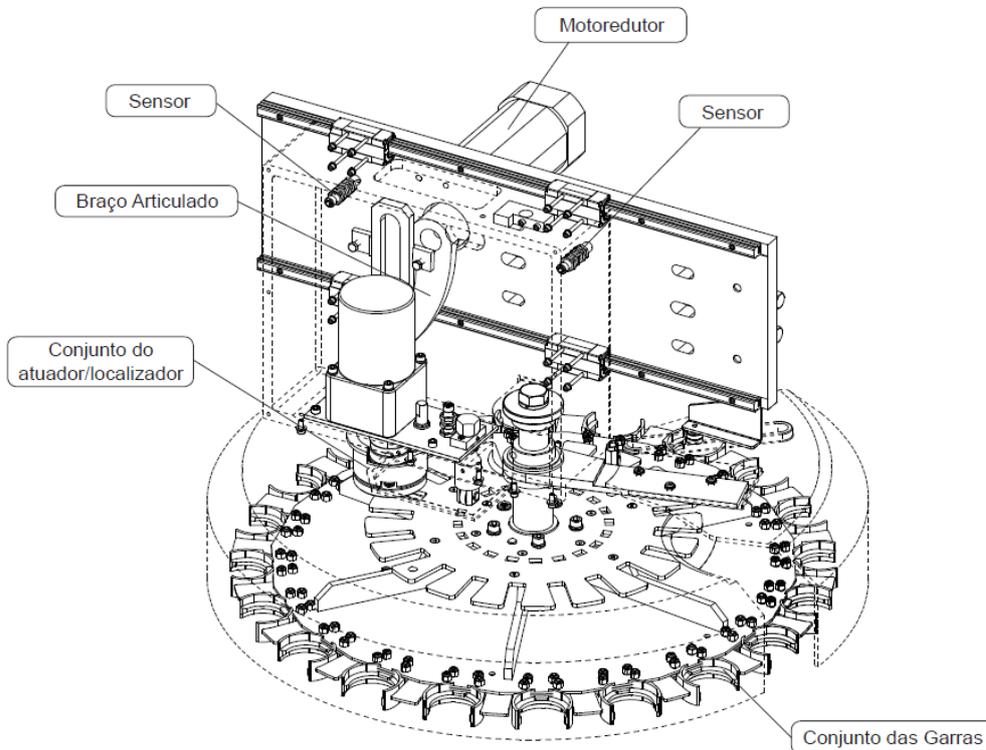
3.1.3 Módulos eletrônicos e módulo de potência

São dois os módulos que apresentaram problemas relevantes: o módulo de acionamento do Magazine e o módulo de I/O (módulo de entradas e saídas digitais). O mais susceptível a falhas é o módulo de acionamento do Magazine. O Magazine é a parte responsável pela troca automática da ferramenta da máquina durante a sua operação, conforme ilustrado na Figura 6. Segundo o manual de manutenção, o trocador automático de ferramentas é constituído basicamente por um sistema de giro e um sistema de deslocamento linear, os quais fazem toda a movimentação do conjunto do disco porta ferramentas por meio de motorreductores.

Foi solicitado a ROMI os dados técnicos do módulo de acionamento do magazine, porém sem sucesso, apesar de todas as tentativas de contato. Também não há disponível na *internet* dados técnicos. A ROMI, entretanto, disponibilizou o diagrama elétrico da máquina em estudo, de acordo com o número de série da máquina e o número do diagrama elétrico. Para descobrir a funcionalidade do módulo foi necessária uma análise do diagrama, do manual de manutenção fornecido pela empresa proprietária da máquina e do próprio módulo.

A função do módulo de acionamento do Magazine é a de converter sinais elétricos DC de 24 V provenientes do módulo de I/O e do controlador CNC/CLP SIMUNERIK 828, da Siemens, realizando o acionamento dos motorreductores que controlam o giro e deslocamento do trocador de peças em tensão AC de 220 V.

Figura 6 - Sistema de deslocamento linear ROMI D600



Fonte: Manual de manutenção ROMI D600.

O outro módulo que apresentou problemas de queima foi o de I/O, que possui 72 entradas e 48 saídas digitais e que se conectam com o CLP do CNC SINUMERIK 828 via o protocolo de padrão de comunicação Ethernet Industrial PROFINET.

O módulo de potência SINAMICS S120 COMBI de 3 eixos é o módulo principal da máquina. É responsável pelo acionamento dos servomotores que controlam os movimentos da mesa, onde a peça é posicionada para sofrer desgastes mecânicos, e também do acionamento do servomotor que controla o movimento da ferramenta de corte. Dois eixos controlam a mesa XY e o eixo acionado pelo servomotor principal, chamado de eixo árvore, realiza o movimento da ferramenta na coordenada Z.

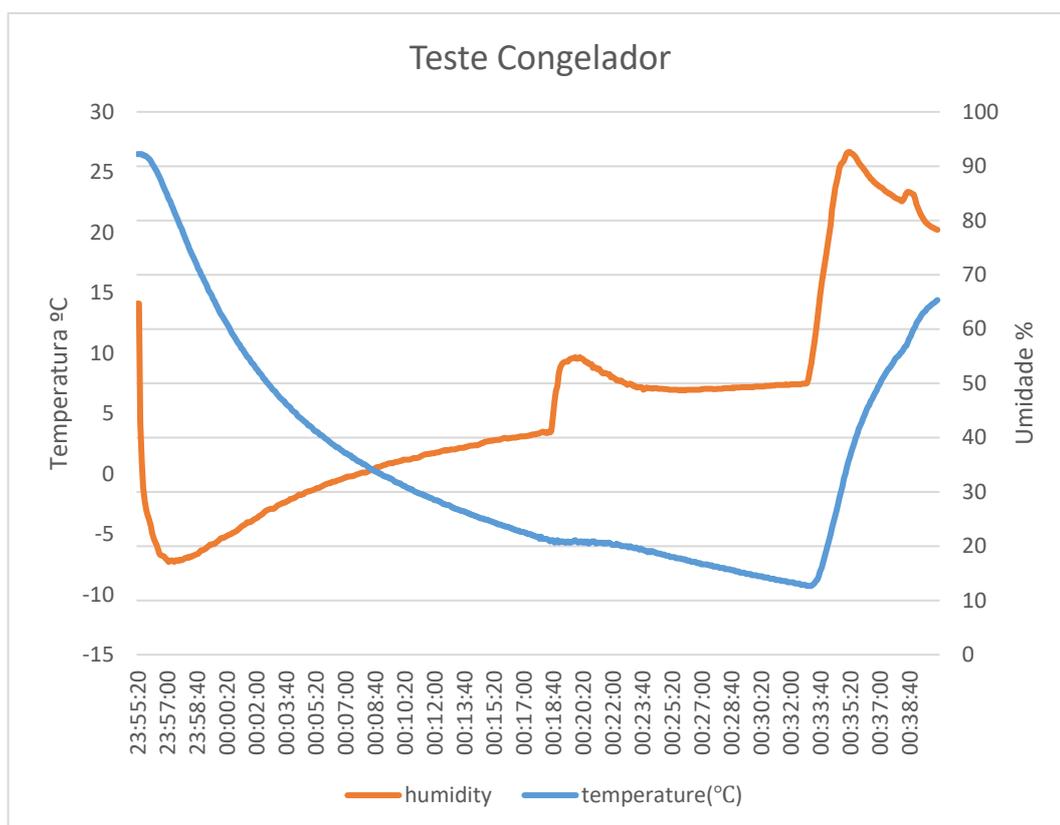
O SINAMICS S120 COMBI possui um extenso manual de operação o qual pôde ser analisado com o objetivo de se obter respostas aos problemas de parada e partida da máquina, tendo em vista que é esse módulo de potência que gera alarmes e trava a máquina impedindo-a de operar visando preservar a sua integridade.

3.1.4 Medições no interior do painel elétrico

Para dar continuidade a investigação, realizou-se a compra de um *datalogger*. Esse equipamento realiza medições de umidade e temperatura, armazenando-as na memória de acordo a configuração feita pelo usuário. As especificações do *datalogger* são as apresentadas a seguir:

- Faixa de medição de temperatura: -40 até 105°C (Precisão de +/- 1°C).
- Faixa de medição de umidade: 0 até 100% RH (Precisão de +/- 3% RH).
- Faixa de medição de ponto de orvalho: -40 até 105°C (Precisão de +/- 1°C).
- Temperatura de operação: -30 até 80°C.
- Umidade de operação: 0 até 90% RH.
- Temperatura de armazenamento: 0 até 40°C.
- Umidade de armazenamento: 0 até 90% RH.
- Intervalo de gravação: ajustável de 1 segundo até 24 horas.
- Capacidade de armazenamento: 20000 dados.

No intuito de validar a qualidade das medições do equipamento, foram realizados dois testes com o medidor, sendo esses no interior de um congelador e em um ambiente com ar-condicionado. O primeiro teste foi realizado no congelador durante um período de 45 minutos, com intervalo de armazenamento de dados de 5 segundos, totalizando 540 dados de medição, conforme Gráfico 3.

Gráfico 3 - Teste do *datalogger* no interior de um congelador

Fonte: Produção do próprio autor.

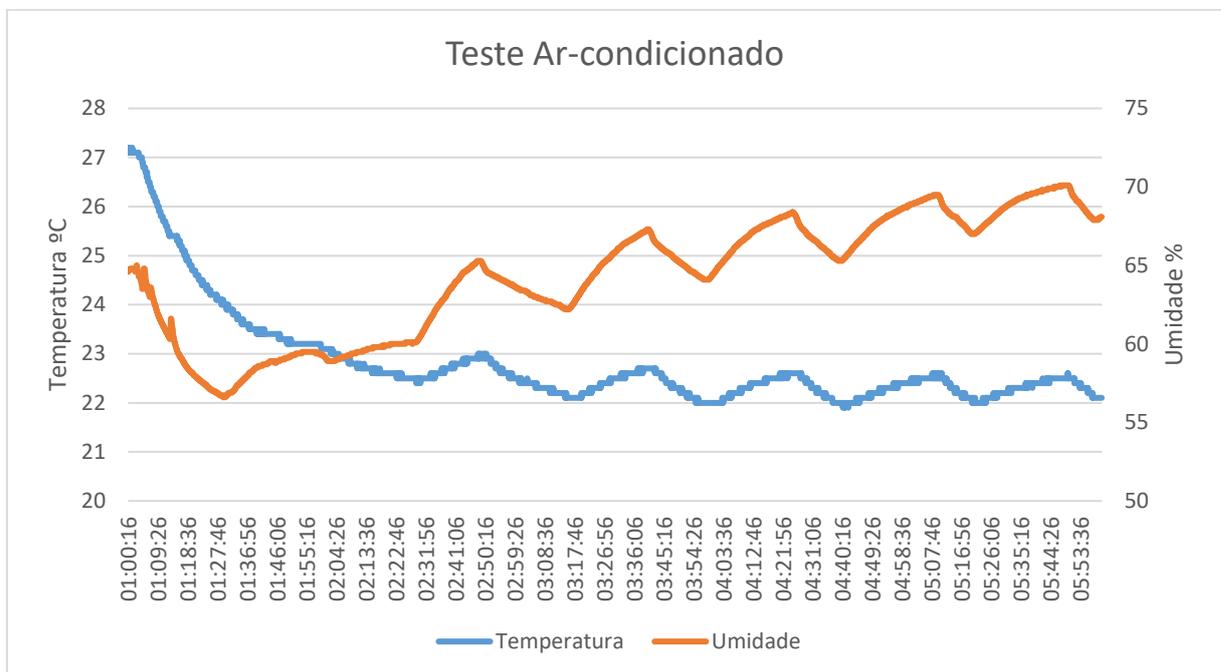
Nos primeiros 23 minutos o medidor permaneceu no interior do congelador com a porta fechada. É possível ver nesse período a temperatura cair até a temperatura de -5°C . Já a umidade relativa cai rapidamente para valores próximos de 17%, que é um valor esperado para um ambiente abaixo de 0°C tendo em vista que o vapor d'água presente no ar passa do estado gasoso para o sólido (sublimação) retirando a umidade presente no ar. A elevação da umidade com o tempo se justifica devido ao ar externo que entra no interior do congelador juntamente com o medidor, estando os dois mais quentes que o ar interno, fazendo com que o ar quente se resfrie surgindo gotículas de água na superfície do *datalogger* e assim aumentando a medição de umidade relativa.

Após passado os 23 minutos iniciais, no intervalo entre 00:18:30 e 00:19:30 foi deixado o congelador com a porta aberta e em seguida fechado novamente, podendo-se notar que a curva de temperatura parou de decrescer e a umidade relativa rapidamente se elevou. A retirada do *datalogger* se deu no horário de 00:33:00 e permaneceu fora do congelador até o fim da medição. Com isso é possível visualizar o aumento da temperatura com o medidor no ambiente externo, assim como a umidade relativa atingindo valores acima de 90% devido a condensação

do vapor d'água do ar ao entrar em contato com o medidor gelado, atingindo assim a temperatura de orvalho.

No segundo teste, o medidor foi posicionado no interior de uma sala durante uma noite, com ar-condicionado ajustado na temperatura de 23°C, realizando as medições durante um período de 5 horas, com gravação de dados no mesmo intervalo de 5 segundos, totalizando 3600 amostras conforme Gráfico 4.

Gráfico 4 - Teste do *datalogger* no interior de uma sala com ar-condicionado



Fonte: Produção do próprio autor.

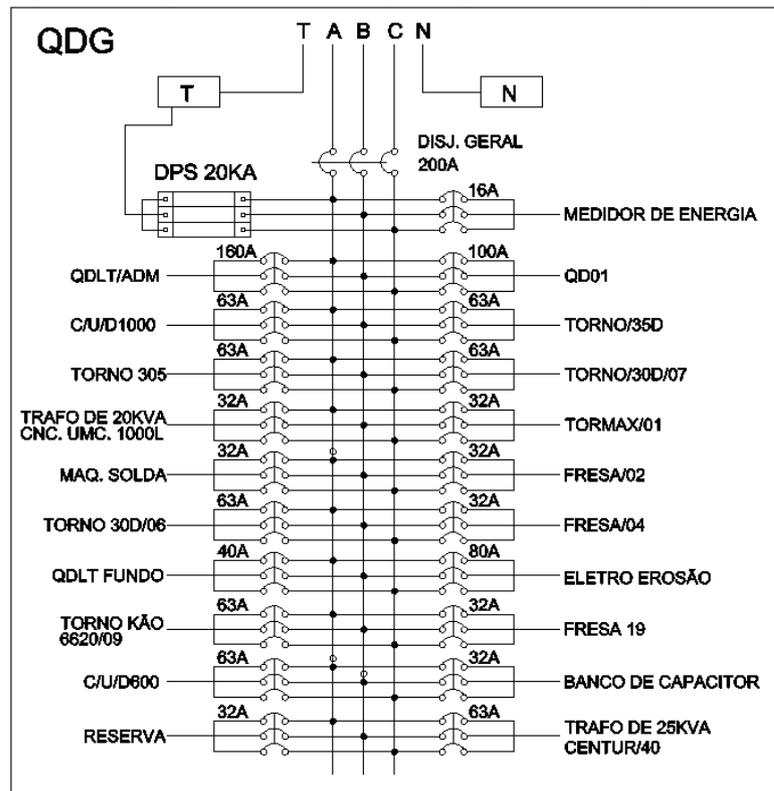
O ar-condicionado trabalha de forma cíclica, isto é, após atingir a temperatura especificada, o aparelho desarma por um tempo até que a temperatura volte a subir. Quando o termostato percebe o aumento de temperatura, o motor é acionado para resfriar o ambiente. Pela linha de temperatura (linha azul) do Gráfico 4, pode-se ver os valores de temperatura decrescendo até a temperatura de aproximadamente 22 °C. O ciclo anteriormente citado é visto ocorrendo em intervalos de 50 minutos. O mesmo ciclo é percebido ao se analisar a curva de umidade relativa. Como a sala onde foi realizada os testes possui frestas e abertura para o ambiente externo, quando o ar-condicionado desliga, o ar quente que entra no ambiente tende a se resfriar atingindo a temperatura de orvalho, condensando na superfície do medidor e assim aumentando a umidade relativa medida pelo aparelho.

Após a realização dos testes de validação do medidor, iniciou-se as medições no interior do painel elétrico da máquina, registrando os valores de temperatura e umidade durante ciclos completos de operação e repouso, ou seja, ciclos de aproximadamente 24 horas de forma a realizar medições no início, durante e após o período de atividades até o início do ciclo seguinte de trabalho. As análises e resultados estão contidas no Capítulo 4.

3.1.5 Verificação do dimensionamento dos condutores elétricos e dispositivos de proteção

Durante a investigação foram verificados os quadros de distribuição da empresa. Há um quadro geral de distribuição, que realiza a alimentação de todas as máquinas de usinagem do galpão. Vale ressaltar que o projeto elétrico da empresa foi completamente refeito no início do presente ano, 2021. Logo todas as instalações e dispositivos elétricos são completamente novos e todos dentro das normas vigentes. Analisando o diagrama multifilar do quadro de distribuição geral da Figura 7, é possível verificar que o disjuntor da máquina ROMI D600, com o circuito sinalizado como C/U/D600, é tripolar de 63 amperes e os cabos de alimentação, verificados em vistoria no local, são de 16 mm².

Figura 7 – Diagrama multifilar do quadro geral de distribuição



Fonte: Administração da empresa.

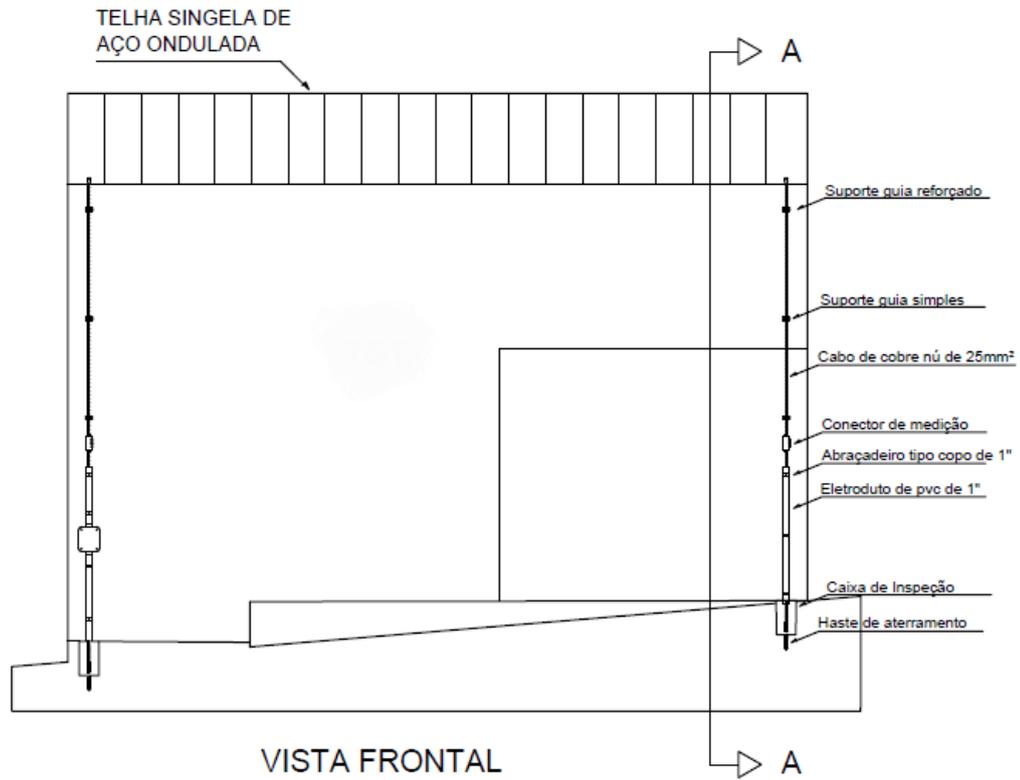
Para verificar se os cabos e o disjuntor utilizados estão bem dimensionados considerando os critérios de condução de corrente, de queda de tensão e de dimensionamento do dispositivo de proteção, realizou-se uma simulação utilizando-se o *software* de engenharia para projetos QiBuilder, o qual possui ferramentas de dimensionamento e realização dos cálculos conforme normas da NBR 5410 e mostradas na seção 2.4 e 2.5 desse projeto, de forma automática.

Inserindo dados do circuito, como a distância do quadro até a entrada de energia do painel, método de instalação, potência da carga, fator de potência etc., o *software* realiza os cálculos de dimensionamento dos condutores e dos dispositivos de proteção. O *software* também permite que sejam fixados os tamanhos dos condutores, gerando mensagens indicando problemas identificados.

3.1.6 Análise da proteção contra descargas atmosféricas e sobretensões

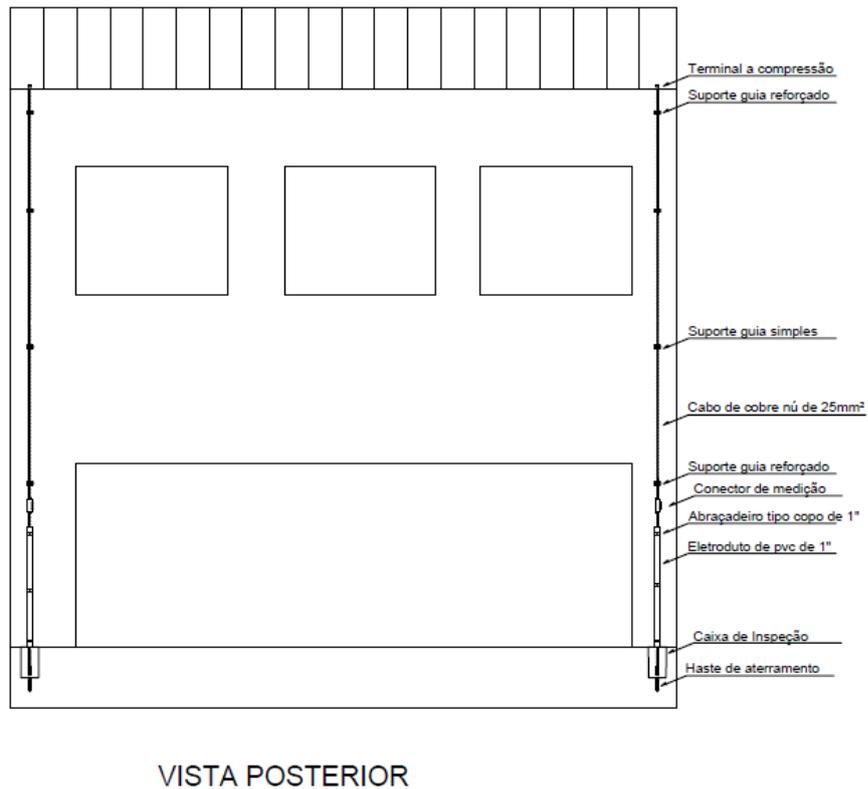
Investigando a existência de um projeto de SPDA na empresa, obteve-se as plantas do projeto realizadas em conjunto com a reforma elétrica, as quais foram submetidas a análises que serão discutidas no próximo Capítulo. O projeto de SPDA fornecido pela empresa pode ser visualizado nas Figuras de 8 a 11.

Figura 8 – Vista frontal das descidas do SPDA e conexão com a telha de aço



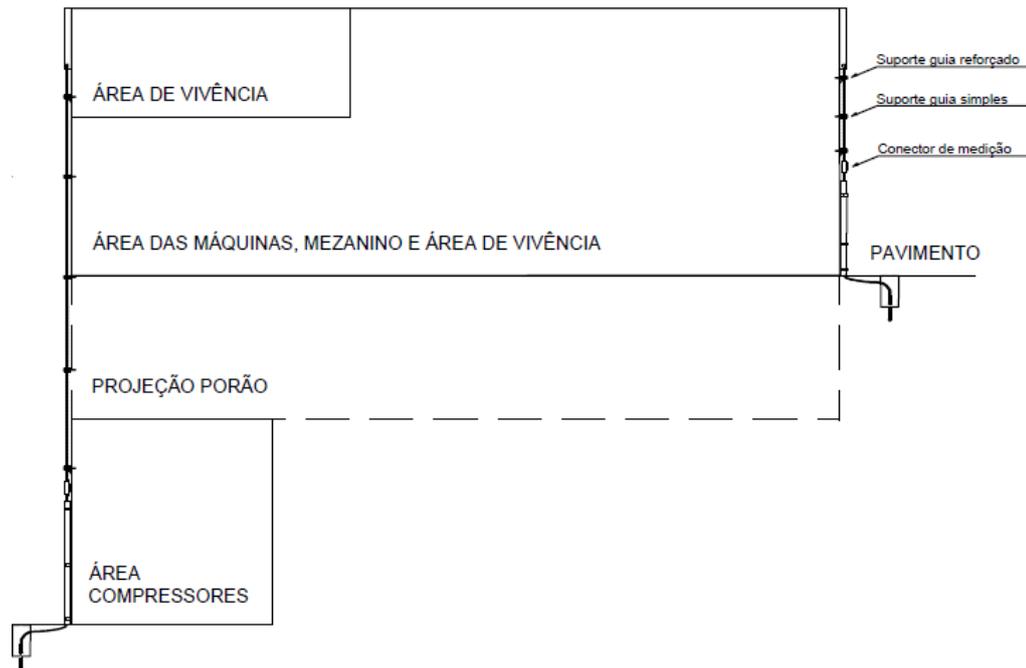
Fonte: Projeto fornecido pela empresa projetista do SPDA.

Figura 9 - Vista posterior das descidas do SPDA e conexão com a telha de aço



Fonte: Projeto fornecido pela empresa projetista do SPDA.

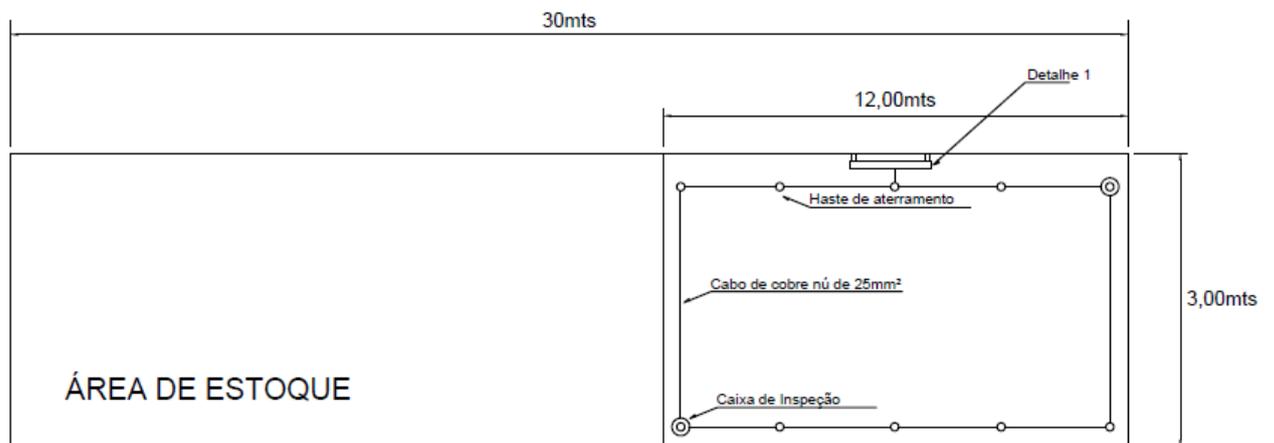
Figura 10 – Corte A-A das descidas do SPDA e conexão com a telha de aço



CORTE A-A

Fonte: Projeto fornecido pela empresa projetista do SPDA.

Figura 11 – Planta baixa da malha de aterramento localizada na área de estoque



PORÃO / MALHA DE ATERRAMENTO

Fonte: Projeto fornecido pela empresa projetista do SPDA.

O item sinalizado como “Detalhe 1” pela empresa projetista na Figura 11 se refere ao Barramento de Equipotencialização (BEP) do qual segue o aterramento de todas as máquinas de usinagem. A conexão do aterramento também é realizada em todas as estruturas metálicas do galpão. Há também a presença de DPS nas três fases da entrada geral, realizando a proteção contra sobretensões.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Resultados e análises da coleta de informações inicial

Após questionados sobre a frequência, possíveis causas e as consequências das ocorrências, foi relatado de forma unânime por todos os três operadores entrevistados de que em dias mais frios, principalmente nos chuvosos, logo no início da operação, ao tentar dar partida na máquina, ela não consegue iniciar, retardando a produção diária, sendo necessários a abertura do painel elétrico e a aplicação de secagem por um período de 10 minutos no interior do painel, ainda precisando-se aguardar mais cerca de 20 minutos após a utilização do secador para que a partida se torne possível.

De acordo com empresas fabricantes de sopradores térmicos, esses aparelhos podem liberar temperaturas que variam de 300°C a 600°C. No âmbito do setor eletroeletrônico, esses sopradores são utilizados para remoção de componentes eletrônicos soldados em placas de circuito impresso. Logo conclui-se que a aplicação do soprador térmico pode ser extremamente prejudicial a integridade dos módulos eletrônicos, e dessa forma a prática não deve mais ser utilizada.

Outro problema que foi relatado e confirmado pelos operadores foi que, em dias mais quentes, geralmente na época do verão, a máquina por vezes para de operar no meio do expediente, podendo demorar por horas até voltar a funcionar normalmente, levando a empresa a perdas de produção.

Além dos problemas relatados pelos operadores, o proprietário ainda informou que manutenções corretivas e troca dos módulos eletrônicos na referida máquina estão muito acima do normal, comparativamente às outras máquinas da empresa, submetidas às mesmas condições operacionais. Além disso, a máquina sob análise, até o momento do início das investigações, é a mais nova da empresa, enquanto há máquinas operando a mais de 10 anos e que até o momento não apresentaram tantos problemas quanto a parte elétrica e/ou eletrônica.

4.2 Análise das condições ambientais externas e internas ao painel elétrico

O galpão contém um número elevado de máquinas de usinagem das mais variadas funções. Máquinas de torneamentos, fresamento, centros de usinagem etc., tanto do tipo CNC quanto convencionais, estando essas máquinas em média, a uma distância de um a dois metros umas das outras, indicando um grande índice de geração e troca de calor no local de operação. Apesar do conjunto das máquinas gerar grande vibração no subsolo, no nível de chão de fábrica, a vibração apresentada pela máquina se encontra dentro dos padrões normais.

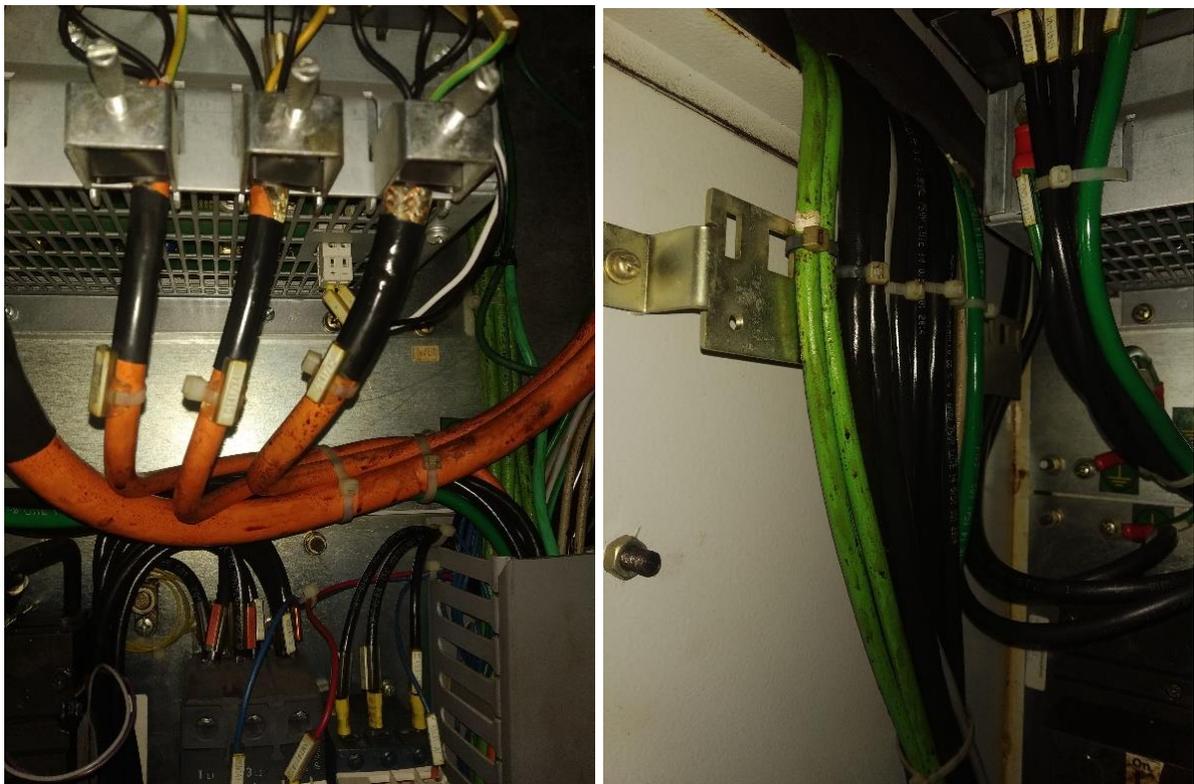
O ambiente fabril apresenta um acúmulo de poeira visualmente moderado, porém ao observar os filtros de saída de ar dos painéis elétricos das diversas máquinas nota-se que há uma grande quantidade de poeira impregnada nos filtros. A empresa ROMI recomenda a troca dos filtros mensalmente ou de acordo com a percepção dos próprios operadores quanto ao nível de sujeira. Há controversas quanto aos relatos dos operadores sobre a frequência da troca dos filtros do painel. Para validar esta informação, foram realizadas vistorias em dias aleatórios para checar o estado do filtro da entrada de ventilação forçada com a máquina operando e constatou-se que os filtros sempre estavam com uma grande quantidade de poeira acumulada. Foi constatado que a limpeza do ventilador de refrigeração do painel não é realizada, dessa forma indo de encontro com o recomendado pelo Quadro 1.

Durante algumas das visitas, foi visto a D600 operando com a porta do painel elétrico entreaberta ou totalmente aberta. Questionados, os operadores disseram que a prática é feita geralmente quando há o problema de partida a frio já citado. Nenhum motivo técnico ou plausível foi fornecido. O funcionamento da máquina com os componentes eletroeletrônicos expostos ao ambiente fabril, além de ser um risco à segurança dos funcionários, pela exposição a equipamentos energizados, pode ser um problema também para os próprios componentes eletrônicos devido ao ambiente repleto de partículas metálicas, provenientes dos cortes em peças metálicas e da geração de cavacos, e vapores oleosos suspensos no ar do galpão. Vide registro de ocorrência do dia 06/11/2018 na Tabela 7. Como apresentado na Tabela 1, componentes eletrônicos são sensíveis a descargas eletrostáticas. Dependendo das condições ambientais, por exemplo, em dias frios e com umidade relativa baixa, o ser humano pode acumular cargas eletrostáticas em quantidade suficiente para gerar potenciais danosos em componentes eletrônicos sensíveis quando tocados sem a devida preparação.

Quanto a limpeza interna do painel elétrico, que por ser único, o chamaremos simplesmente de painel, verificou-se a necessidade de que esta tarefa seja executada periodicamente, tendo em

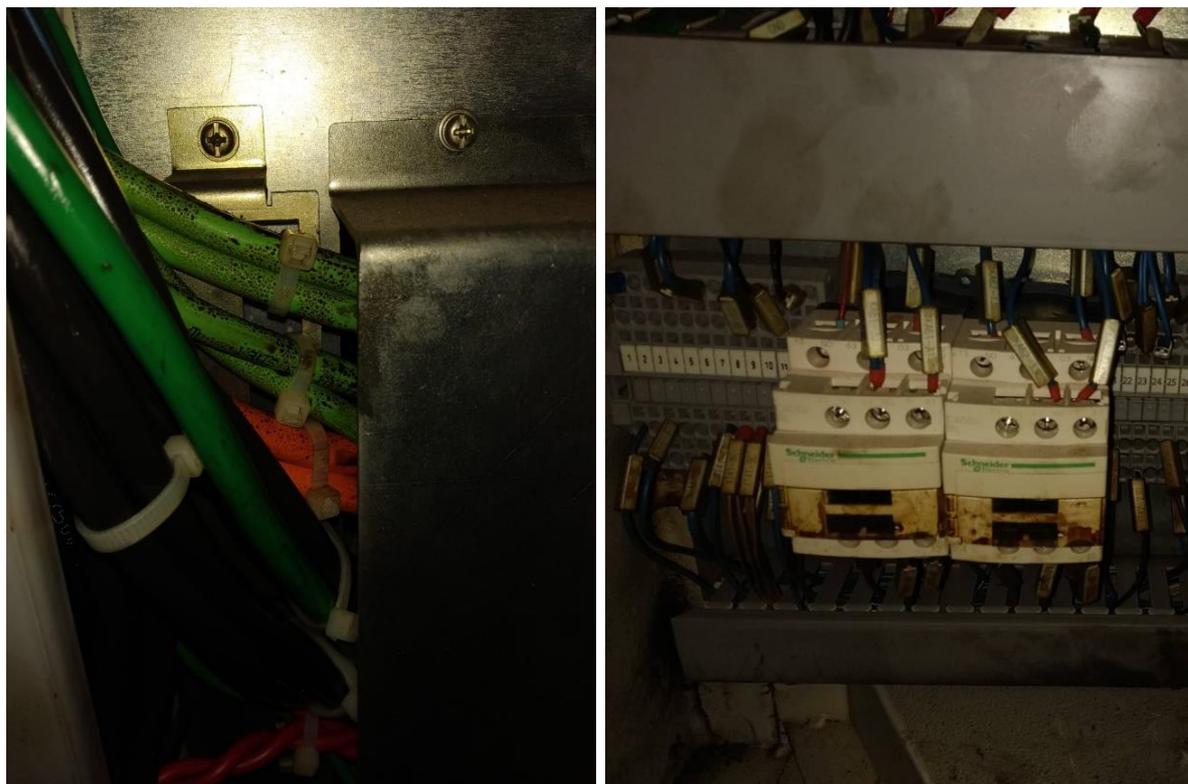
vista a quantidade excessiva de óleo contida principalmente sobre os cabos elétricos e nas proximidades das entradas da fiação para o interior operacional da máquina, podendo-se concluir de que há contaminação de óleo dentro do painel por meio das entradas por onde os cabos elétricos chegam. Também há a presença de óleo nos dispositivos elétricos, tais como contadores e disjuntores e módulos eletrônicos. As imagens das Figura 12 e Figura 13 mostram a grande quantidade de óleo nos cabos de energia, nas entradas das fiações e nos dispositivos de proteção.

Figura 12 – Presença de óleo nos cabos elétricos



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 13 – Presença de óleo na entrada dos cabos elétricos e nos contadores



Fonte: Produção do próprio autor.

Quanto ao reaperto da fiação, por ser anual, não foi possível identificar se a prática é realmente realizada, entretanto, na checagem do painel foi verificado que os cabos se encontravam devidamente apertados aos dispositivos internos, possivelmente pelo fato de o projeto elétrico da empresa ter sido recentemente refeito.

Ainda referente ao manual de manutenção, há um aviso enfatizando de que o painel deve encontrar-se devidamente vedado, para que não haja a contaminação com poluentes, e caso seja encontrado sujeira interna ao painel, deve ser prontamente removida. Como mencionado anteriormente essa limpeza interna não vem sendo realizada. A vedação da porta do painel é feita através de borracha em toda a extensão de suas bordas. Entretanto quando a operação é feita com a porta aberta ou entreaberta, a entrada de poluentes é permitida.

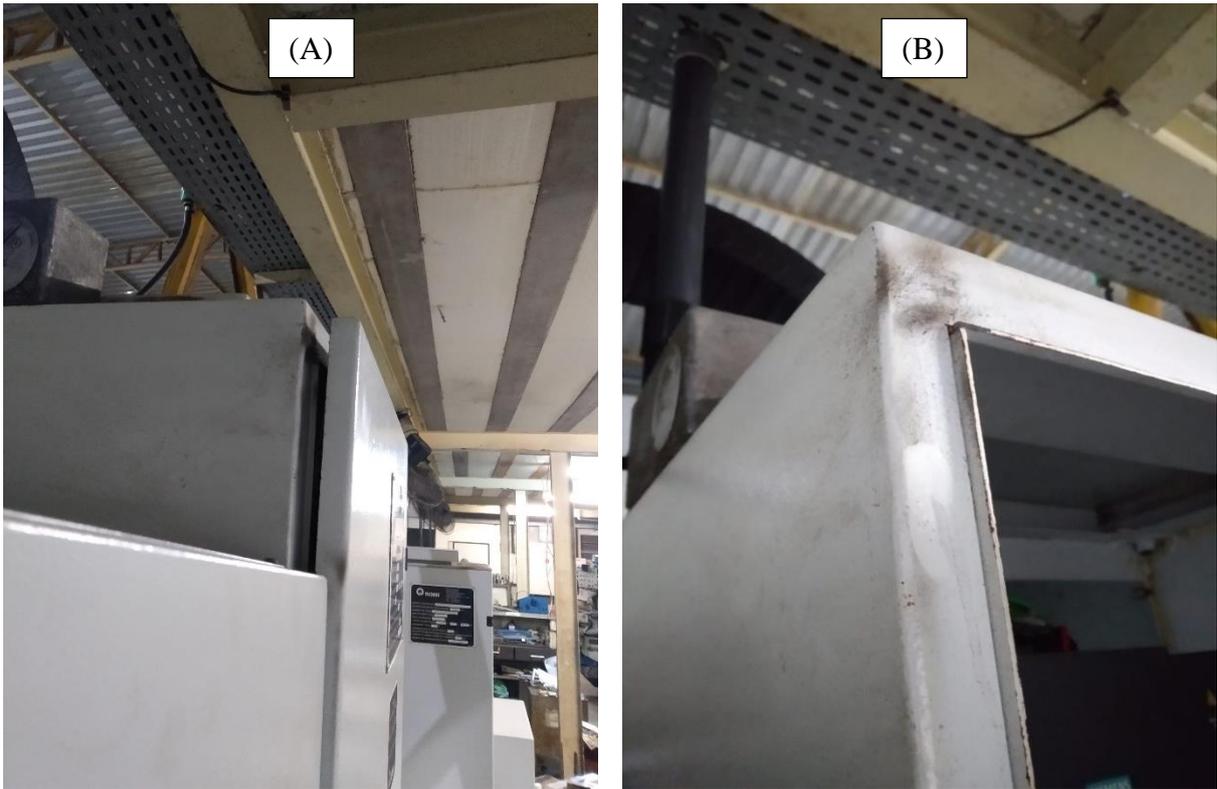
Na usinagem de peças é utilizada uma grande quantidade de água e óleo solúvel para facilitar a realização dos cortes e furações, refrigerar e lubrificar as peças metálicas. No processo, a temperatura média de corte chega a variar de 300 °C até 900 °C devido ao atrito gerado entre a ferramenta e a matéria prima sob desgaste mecânico. A água adicionada de óleo solúvel

utilizada para lubrificação possui uma temperatura de evaporação de 100 °C, logo, para as temperaturas de corte atingidas, ocorre a evaporação da mistura formando uma névoa de óleo. Ao abrir o interior da máquina para retirar uma peça usinada a névoa sai para o ambiente externo. A passagem de cabos entre o compartimento onde a máquina opera e o painel não é totalmente vedada, sendo mais um caminho de contaminação do painel.

Esta névoa, ao adentrar o interior do painel, entra em contato com as superfícies expostas dos seus componentes internos se condensando nelas. A névoa de óleo além de causar danos aos dispositivos e módulos da máquina, também podem causar doenças, alergias e até mesmo doenças pulmonares graves aos seres humanos.

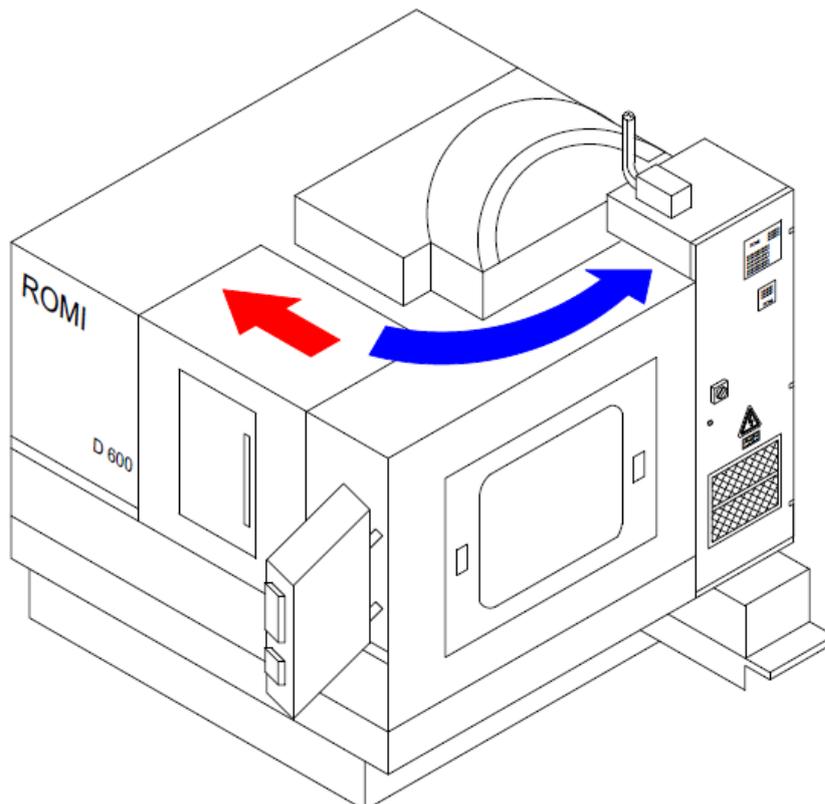
A porta do painel possui duas travas, uma feita pelo disjuntor geral, que tranca a porta quando ligado, e uma trava de segurança fechada através de uma chave. É comum a operação da máquina com a porta trancada apenas com a trava do disjuntor geral, porém ao operar dessa maneira, surge uma abertura na parte superior da vedação da porta que pode ser vista na imagem (A) da Figura 14, permitindo a entrada de poeira, umidade e partículas suspensas no ar para dentro do painel. É possível ver também uma mancha de óleo e poeira impregnada na parte externa da porta, mesmo local em que há a falha da vedação. Pelo desenho da Figura 15, vê-se a proximidade da parte superior do painel com a abertura da porta da máquina de usinagem, por onde a névoa formada durante a usinagem sai para o ambiente externo e assim entrando no interior do painel. A seta vermelha indica o sentido em que a porta de acesso ao interior da máquina abre. Já a seta azul indica o percurso que a névoa faz até chegar na parte superior do painel.

Figura 14 – Painel operando com abertura superior da porta (A) e marca de mancha de óleo e poeira (B)



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 15 – Detalhe 3D da máquina de centro de usinagem ROMI D600



Fonte: Produção do próprio autor.

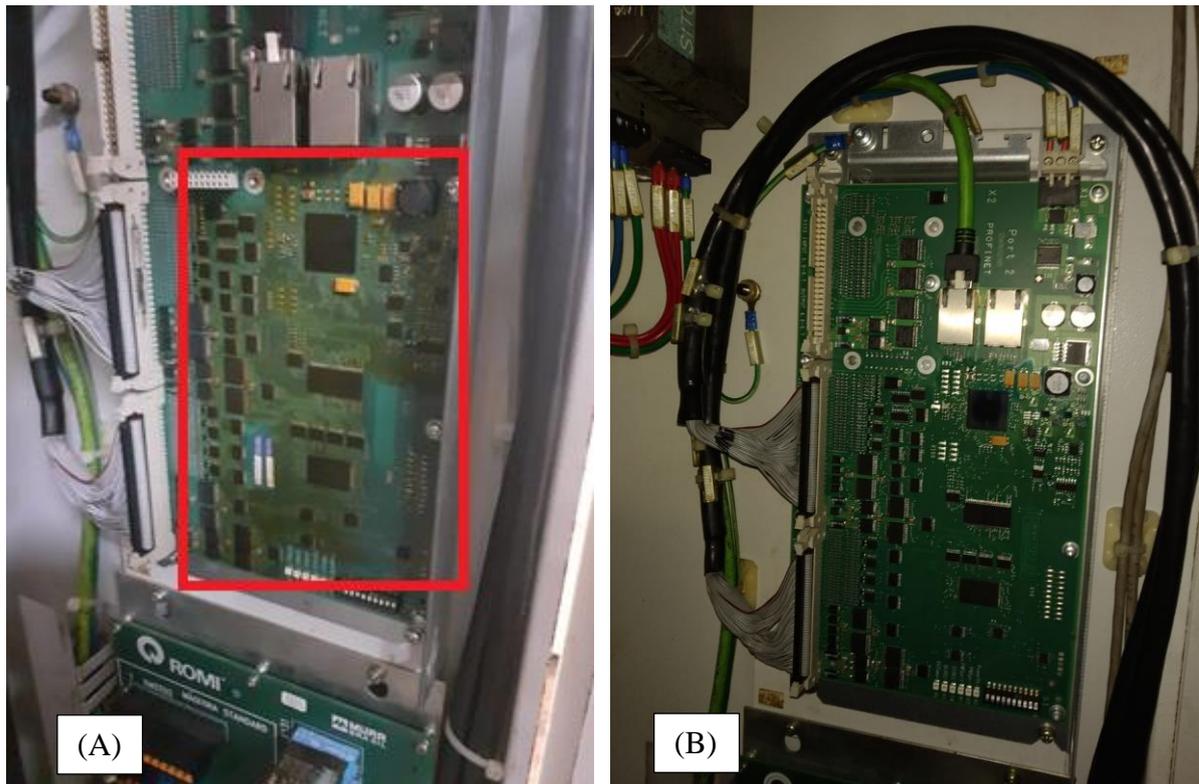
4.3 Análise dos problemas nos módulos eletrônicos e módulo de potência

De acordo com os relatórios técnicos e notas fiscais sobre a queima do módulo acionador do Magazine, vê-se que na maioria dos casos ocorreu a queima do TRIAC BTA41 800B. No *datasheet* do TRIAC os parâmetros operacionais do componente são estabelecidos para uma operação na temperatura ambiente de 25°C. Observando o módulo contido no painel, notou-se que não há qualquer dispositivo de proteção destinado a proteção do TRIAC, deixando-o susceptível a queima.

Há inseridos na programação da máquina alarmes de temperatura e sobretensões que interrompem o seu funcionamento. O manual do módulo de potência da Siemens, também afirma que se a umidade relativa do ar em contato com os aparelhos SINAMICS for maior que 80% por muito tempo pode-se ocorrer a falha de isolamento dos aparelhos devido a reações eletroquímicas.

No módulo de I/O foi possível verificar que a placa sofreu uma queima quase que total de seus componentes eletrônicos, observando-se uma grande mancha escura formada na sua superfície, conforme Figura 16 imagem (A). A imagem (B) é referente ao módulo novo.

Figura 16 – Módulo de I/O queimado (A) e módulo de I/O novo (B)



Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 Análise do projeto de SPDA

Analisando as Figura 8 a 11 pode-se ver que a malha de aterramento fica localizada no subsolo do galpão e possui dimensão de 12x3 metros, conectada com um total de 10 hastes de cobre tipo Copperweld com espaçamento de 3 metros entre si. No galpão não foram utilizados captadores convencionais a exemplo do para-raios tipo Franklin. A captação, que tem por sua função interceptar descargas atmosféricas, é feita utilizando a própria telha metálica da estrutura. Há um total de 4 descidas, localizadas nas extremidades externas do galpão e conectadas ao telhado de aço, fazendo a conexão da telha com ao aterramento permitindo assim o escoamento de descargas atmosféricas que venham a atingir o galpão. No subsolo também está instalado o BEP (Barramento de Equipotencialização).

De acordo com a NBR 5419-3 (2018), as chapas de aço que compõem o telhado do galpão só podem ser utilizadas como captador natural se tiverem uma espessura de chapa maior ou igual a 0,5mm, para o caso do aço, estando o projeto dentro da norma nesse quesito. Nos relatórios de análise fornecidos pela empresa responsável pelo projeto de SPDA o número de descidas

necessárias calculado foi menor do que duas, porém segundo o item 5.3.3 da NBR 5419-3, para SPDAs convencionais o número de descidas não deve ser menor do que dois mesmo se os cálculos indicarem um número menor. Como no projeto há 4 descidas postadas nas extremidades do galpão, a quantidade de descidas está de acordo com a norma.

Os relatórios de SPDA fornecidos não indicam qual foi a classe do SPDA calculada pelo projetista, porém, para fins de análise de dimensionamento, se considerar-se que o galpão seja classe IV, isto é, a classe mais simples possível, por norma, a distância entre os condutores de descida e os eletrodos que formam uma malha fechada em contato com a superfície da estrutura, chamados de anel condutores, deve ser de no máximo 20 metros. Pela Figura 11 pode-se ver que a maior distância entre duas hastes de aterramento é de 18 metros (há uma haste em cada extremidade do galpão, vide as Figura 8 e 9).

Apesar de o projeto atender as exigências até aqui mencionadas, ele possui parâmetros fora dos estabelecidos pela ABNT NBR 5419 parte 3, mesmo considerando-se um projeto de classe IV. Todos os condutores de cobre nu que constituem o projeto foram projetados com a dimensão de 25 mm², porém, de acordo com o item 5.6.2 da norma que estabelece as dimensões mínimas dos condutores, os cabos da malha de aterramento deveriam ser de cobre nu 50 mm² e os cabos de descida do telhado até as hastes de aterramento deveriam ser de cobre nu de 35 mm². Logo se conclui que o projeto de SPDA não está dentro dos padrões normativos da ABNT. Foi verificado também que a malha de aterramento está em desacordo com a projetada conforme desenho da Figura 11, pois a malha real do galpão se estende por todo o perímetro da área de estoque, estando em conformidade apenas a localização das hastes de aterramento.

Em relação aos efeitos eletromagnéticos sobre o módulo de potência SINAMICS S120 Combi, o manual da SIEMENS informa que, para que não ocorram tais efeitos, os cabos de alimentação do módulo de potência, cabos de sinal analógico de corrente contínua, cabos para sensores e todos os cabos dos motores devem ser blindados. Pela imagem (A) da Figura 12 pode-se ver que os cabos de alimentação e os cabos de saída para os servomotores possuem blindagem, da mesma forma que os cabos de sinal analógico, como pode ser visto na imagem (B) da Figura 16. Uma vez que as blindagens estão de acordo com o especificado e dispositivos DPS são empregados no quadro de distribuição geral, conclui-se que os equipamentos estão protegidos contra os efeitos danosos de ondas eletromagnéticas.

4.5 Análise do dimensionamento dos condutores e dispositivos de proteção

O motor principal da ROMI D600, que controla o eixo árvore, possui potência nominal de 13kW, rendimento de 0,914 e fator de potência 0,840 indutivo. Os outros dois motores, que realizam os movimentos da mesa possuem potência de 2,2kW e os mesmos valores de rendimento e fator de potência. Com isso, a potência nominal trifásica da máquina, com os três motores operando é de $P_n = 22,6kVA$.

Os módulos de potência da Siemens operam com um ciclo de carga chamada de S6, no caso do módulo da máquina CNC em estudo, o ciclo tem duração de 10 minutos. O ciclo ou regime S6 funciona da seguinte forma: a máquina, durante a usinagem de uma peça, trabalha com potência de alimentação S6 durante 4 minutos e em 70% do valor da potência nominal por 6 minutos, repetindo esse ciclo até que a peça esteja concluída. A relação entre as potências S6 e nominal é fornecida pela SIEMENS e dada pela equação (21) abaixo. O ciclo de operação S6 é observado na Figura 17.

$$P_{S6} = 1,325 \times P_n \quad (21)$$

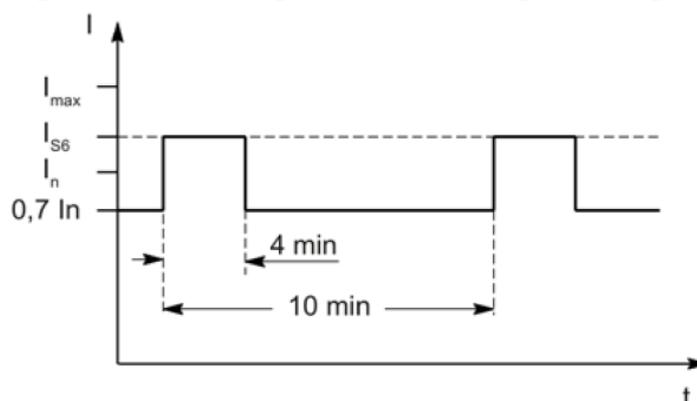
Onde:

P_{S6} – Potência de alimentação S6;

P_n – Potência nominal.

Desta forma a potência total exigida pela máquina é a fornecida pela equação (21), resultando em um valor de $P_{S6} = 30kVA$.

Figura 17 – Ciclo de carga S6 com ciclo de carga de 600 segundos

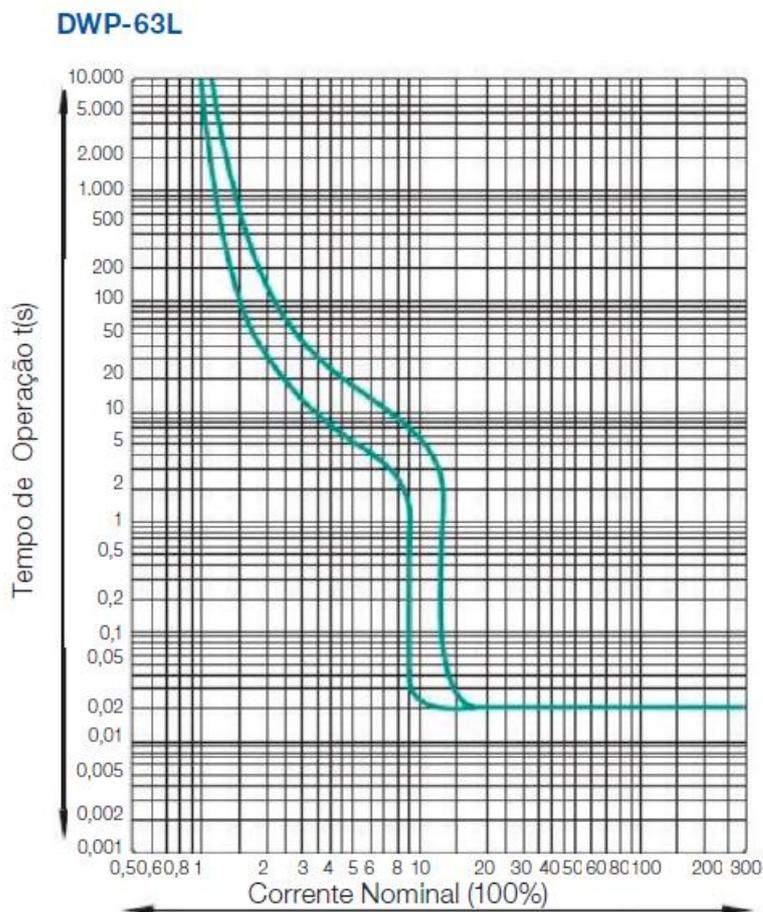


Fonte: Manual do aparelho SINAMICS S120 Combi.

Para realizar as simulações de dimensionamento, foi necessário medir as distâncias percorridas pelos cabos, considerando as subidas e descidas até chegar na carga final. Também foi necessário verificar o método de instalação e o número de circuitos que compartilham o conduíte.

O circuito que alimenta a ROMI D600 é constituído de 3 condutores fase e um condutor terra, todos de cobre com isolamento de PVC de 750 V e 70 °C na dimensão de 16 mm². A proteção do circuito é feita por um disjuntor de 63 A - modelo DWP63L-63-3 da WEG cuja curva de disparo é mostrado na Figura 18. O comprimento dos cabos até a máquina é de aproximadamente 25 metros com passagem em eletrocalha perfurada e sem tampa (método de instalação F), na qual estão instalados mais 6 circuitos de alimentação das outras máquinas de usinagem, totalizando 7 circuitos. A temperatura ambiente considerada foi de 40 °C. Com esses dados realizou-se a simulação.

Figura 18 – Curva de disparo do disjuntor existente



Fonte: WEG.

O valor do FCA relativo ao método de instalação e ao número de circuitos contidos na eletrocalha é de 0,73 e pode ser visto na Tabela 3. Já o valor de FCT para isolamento PVC tem o valor de 0,87 conforme Tabela 2. A corrente de projeto e a corrente corrigida, indicadas nas equações (1) e (2), respectivamente são de $I_p = 78,73 A$ e $I_c = 123,96 A$. A queda de tensão total sofrida nos condutores foi fornecida pelo *software* QiBuilder com um valor de 1,94%. Como o limite estabelecido para quedas de tensão em circuitos terminais é de 4%, os cabos atendem esse quesito. Entretanto, a máxima capacidade de corrente dos cabos de 16 mm² com as características descritas anteriormente é de $I_{cabo} = 85 A$, logo, a fiação que alimenta o CNC é insuficiente para a corrente corrigida exigida, causando o aquecimento dos cabos quando a máquina opera na sua potência de ciclo S6, estando sujeita aos riscos já mencionados.

Pelas equações (7) e (8), temos que $I_z = 53,98 A$ e $I_2 = 91,35 A$. Como não é possível garantir a temperatura limite dos condutores conforme seção 2.5.1 devido ao ciclo de operação da máquina, o disjuntor estará corretamente dimensionado se satisfizer as inequações (5) e (9). Entretanto, como as expressões $78,73 \leq 63 \leq 53,98$ e $91,35 \leq 53,98$ não são verdadeiras, o disjuntor não protege o cabo contra sobrecorrentes e ainda trabalha com correntes acima da nominal do disjuntor regularmente. O motivo pelo qual o disjuntor não desarma durante a operação se deve ao fato de a sobrecorrente permanecer por intervalos de no máximo 4 minutos, com uma corrente de 1,25 vezes a corrente nominal. Pela curva da Figura 18, para esse nível de sobrecorrente seriam necessários aproximadamente 16 a 17 minutos para que o disjuntor desarmasse.

Utilizando o *software* que dimensiona os cabos e o dispositivo de proteção para as características de instalação dos condutores de alimentação da máquina, o cabo especificado foi o de cobre com isolamento de EPR de 25 mm², marca referência *Prysmian Voltalene Ecolene*, que possui uma capacidade de condução de $I_{cabo} = 141 A$. A escolha desse cabo altera o FCT para 0,91 e com isso a corrente corrigida também altera para o valor de $I_c = 118,52 A$, estando a capacidade do cabo escolhido acima desse valor e dessa forma garantindo a condução de corrente sem que a temperatura do cabo atinja valores prejudiciais. A queda de tensão total para esses cabos é de 1,24%.

Como nesse caso a capacidade de condução é maior que a corrente corrigida e sabendo que o circuito de alimentação da ROMI D600 é exclusivo, ou seja, não há outras cargas conectadas no circuito, pode-se garantir os limites de temperatura dos condutores conforme seção 2.5.1 e assim o dimensionamento do disjuntor deve ser de tal forma que atenda as inequações (5) e (6), onde $I_z = 93,67 A$. Escolhendo um disjuntor de corrente nominal igual a 80 A, tem-se $I_2 = 116 A$. Dessa forma as expressões $78,73 A \leq 80 A \leq 93,67 A$ e $116 A \leq 1,45 \times 93,67 = 135,82 A$ são verdadeiras e com isso o disjuntor atende as características de instalação, carga e proteção dos cabos. O disjuntor previsto deverá possuir curva de atuação C.

O transformador instalado no poste da concessionária que alimenta o galpão possui potência nominal de 112,5 kVA logo, pela Tabela 5, tem-se que, para tensões de 127/220 V, $I_{k0} = 5,6 kA$. Pela equação (10), com $l = 25 m$, $S = 25 mm^2$ e $\cos\theta_{k0} = 0,7$, conforme Tabela 4, a capacidade de interrupção de curto-circuito necessária do disjuntor é descrita na equação (22).

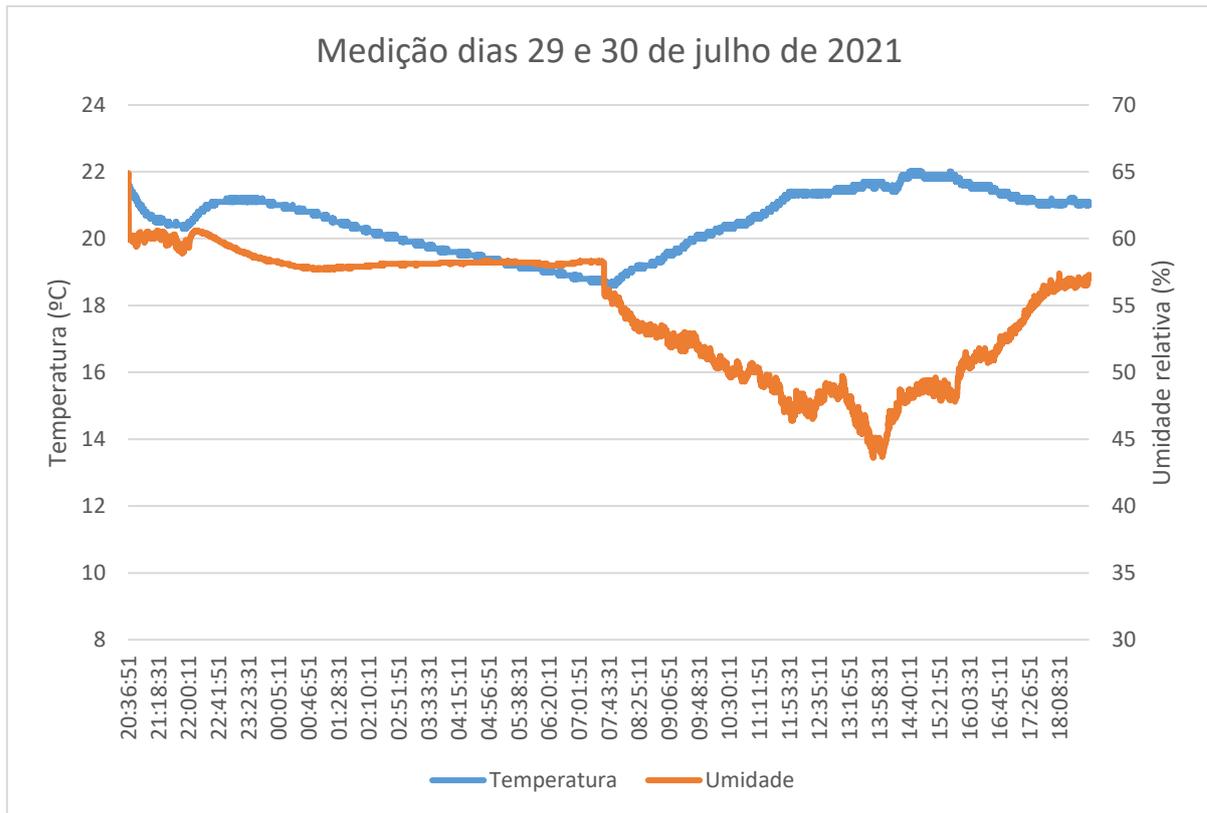
$$I_k = \frac{12,7}{\sqrt{\frac{162}{5,6^2} + \frac{52 \times 0,7 \times 25}{5,6 \times 25} + \frac{5 \times 25^2}{25^2}}} = 3,11 kA \quad (22)$$

4.6 Medições com o datalogger

As medições realizadas com o *datalogger* no interior do painel elétrico foram realizadas com o medidor em diferentes posições afim de fazer um comparativo entre elas. Adicionalmente foi realizada uma medição fora do painel, próxima da entrada de ar, para avaliar o comportamento da umidade no ambiente externo em um ciclo de operação.

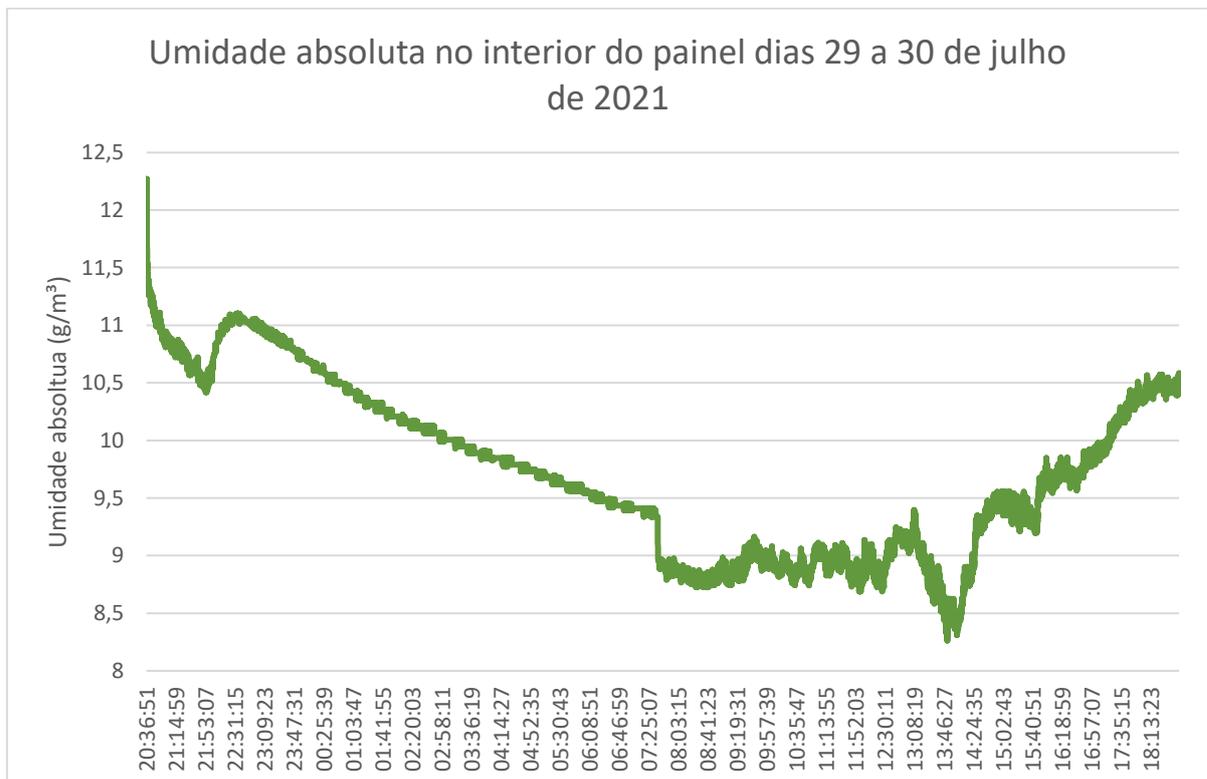
A primeira medição foi feita entre os dias 29 e 30 de julho, com o medidor inserido no interior do painel próximo da entrada de ar. Ao todo foram coletados 20000 dados em intervalos de 10 segundos com início às 20:36:51 do dia 29 e fim às 18:50:07 do dia 30 de julho os quais podem ser observados no Gráfico 5. Através das equações (15) e (20), onde $M_{H20} = 18,01528 g/mol$, $R = 8,314462 \frac{Pa.m^3}{mol.K}$, a temperatura é dada em graus Celsius e a umidade relativa é adimensional, pôde-se gerar a curva de umidade absoluta em g/m^3 apresentada no Gráfico 6.

Gráfico 5 - Medição de temperatura e umidade no interior do painel nos dias 29 e 30/07/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

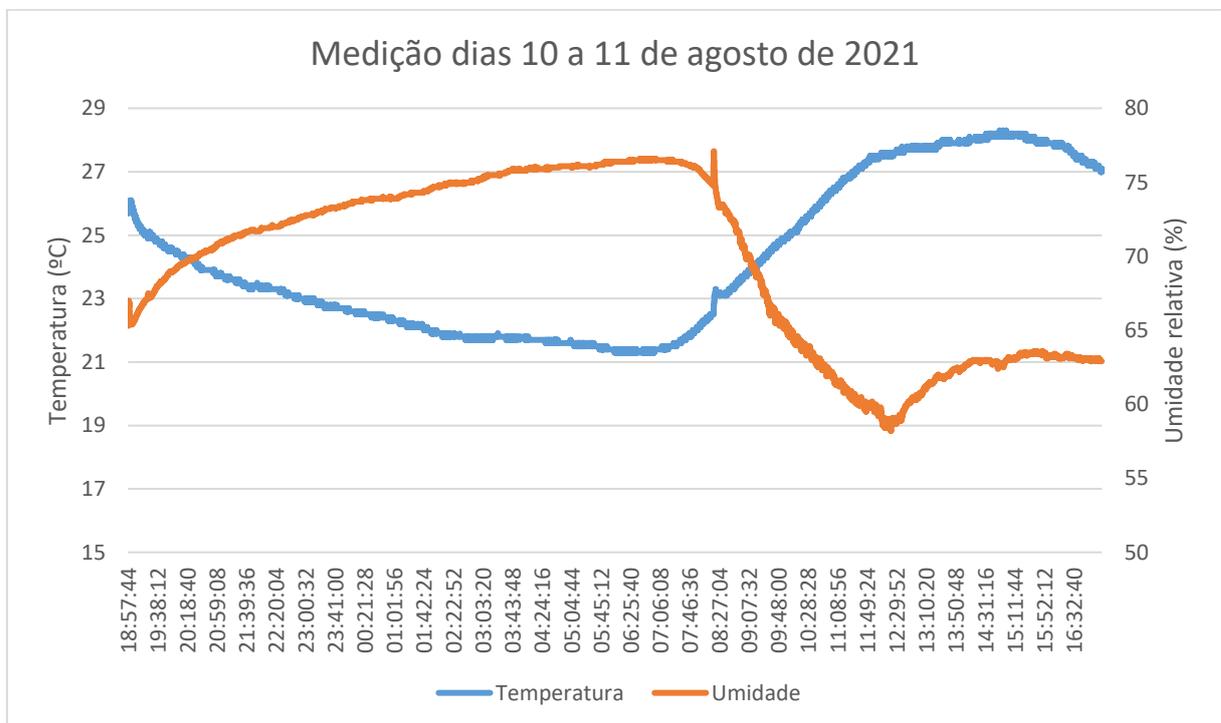
Gráfico 6 - Umidade absoluta no interior do painel elétrico nos dias 29 e 30/07/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

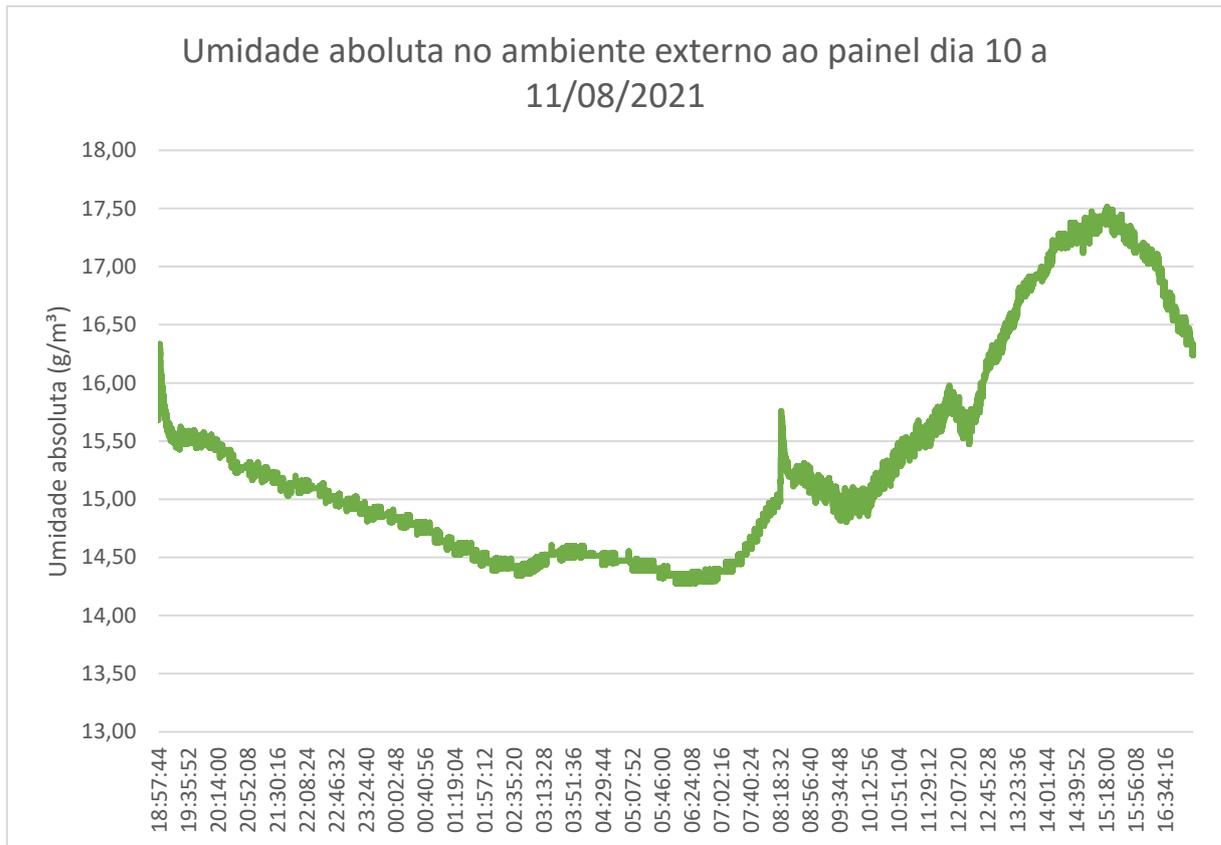
A segunda medição foi realizada, dessa vez externa ao painel, próxima ao filtro da entrada de ar, para que fosse possível analisar o comportamento no ambiente externo a máquina. A medição foi feita com os mesmos parâmetros da anterior, com início às 18:57:44 do dia 10 de agosto de 2021 e fim às 17:11:00 do dia 11 de agosto de 2021. Os resultados são mostrados no Gráfico 7 e Gráfico 8.

Gráfico 7 - Medição de temperatura e umidade no ambiente externo ao painel nos dias 10 e 11/07/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 8 - Umidade absoluta no ambiente externo ao painel elétrico nos dias 10 e 11/08/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

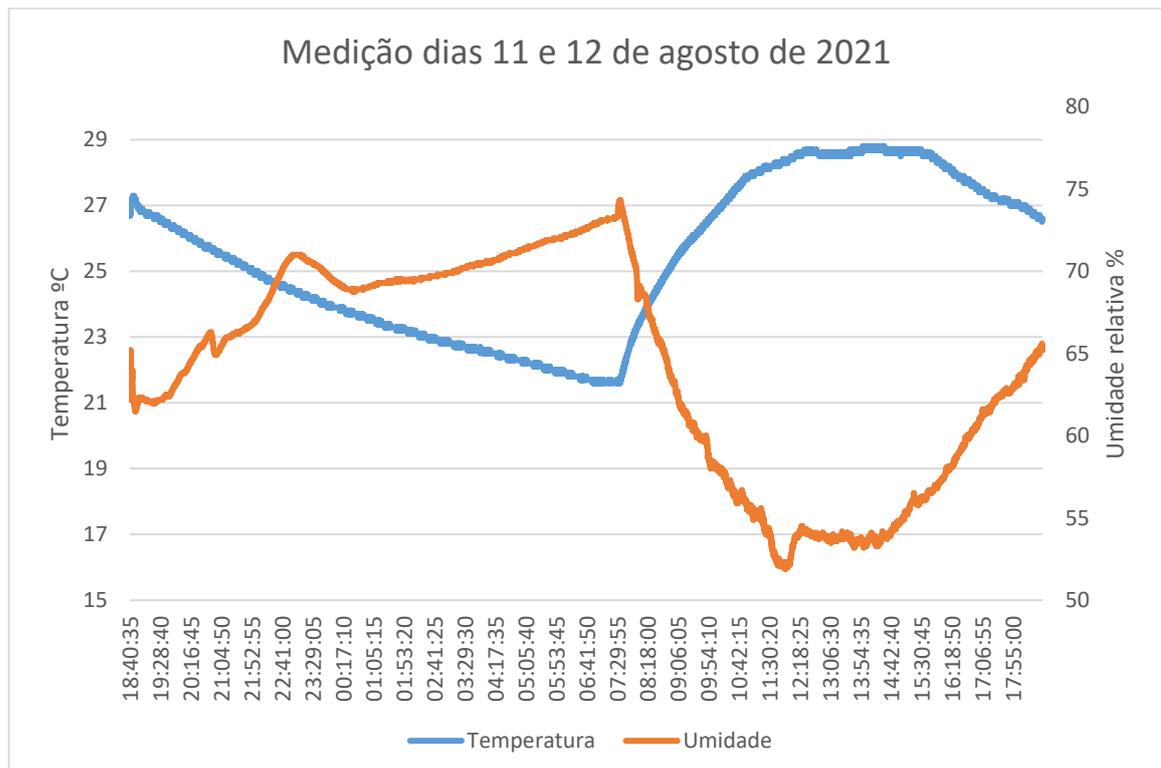
Em seguida foram realizadas mais duas medições, dessa vez com o *datalogger* posicionado em cima do módulo de acionamento Magazine, vide Figura 19. Foram coletadas 17300 amostras com intervalo entre as medições de 5 segundos nos dias 11 a 12/08/2021 e 30 a 31/08/2021, por um período que pode ser observado nos Gráficos de 9 até 12 assim como os resultados obtidos.

Figura 19 – Posição do *Datalogger* sobre o módulo Magazine



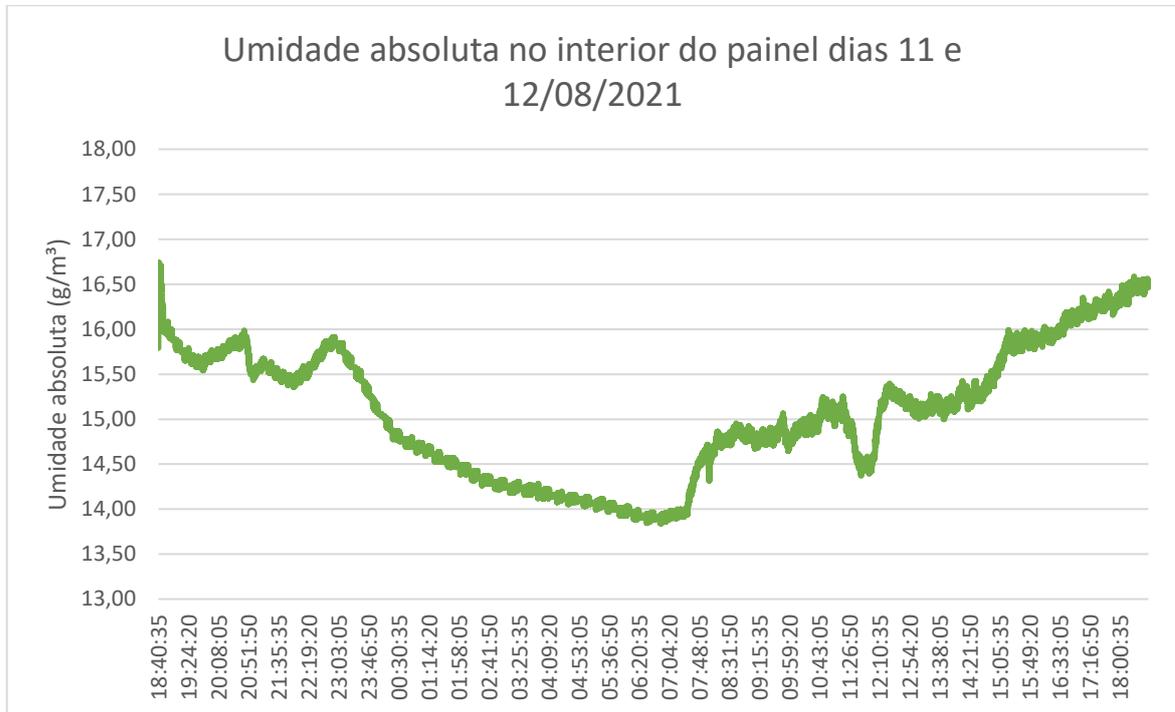
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 9 - Medição de temperatura e umidade em cima do módulo Magazine nos dias 11 e 12/08/2021



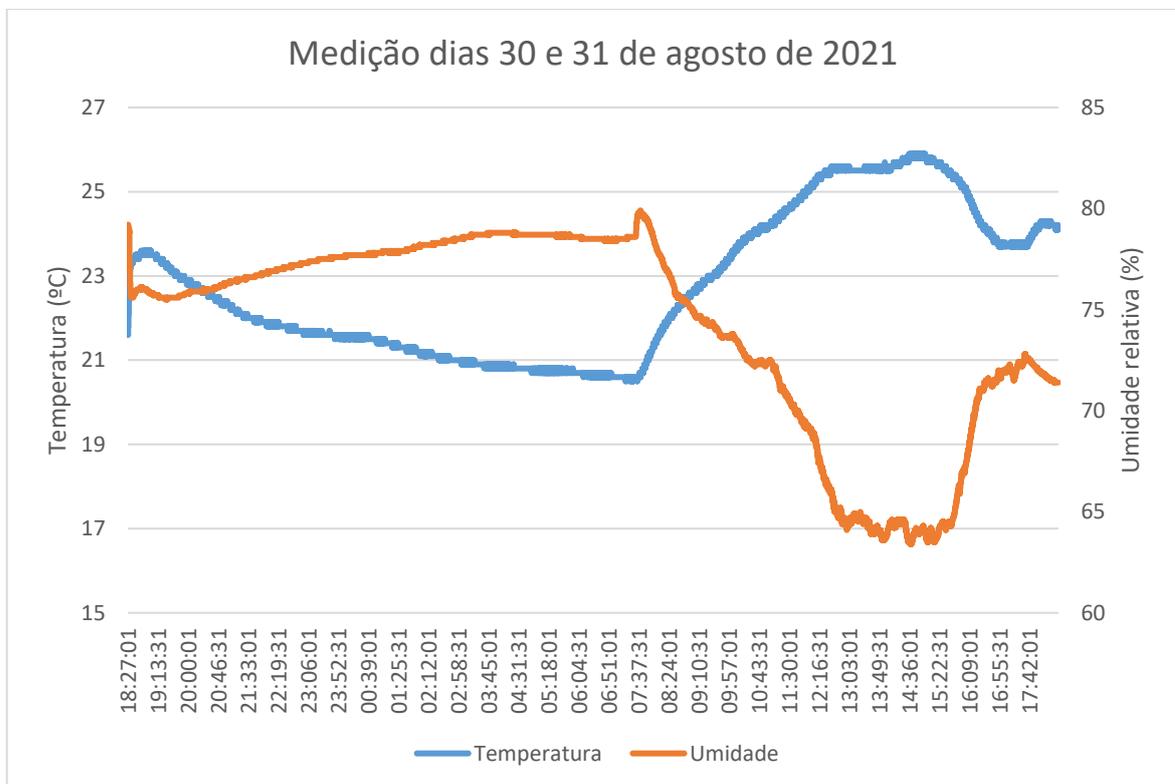
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 10 – Umidade absoluta no interior do painel nos dias 11 e 12/08/2021



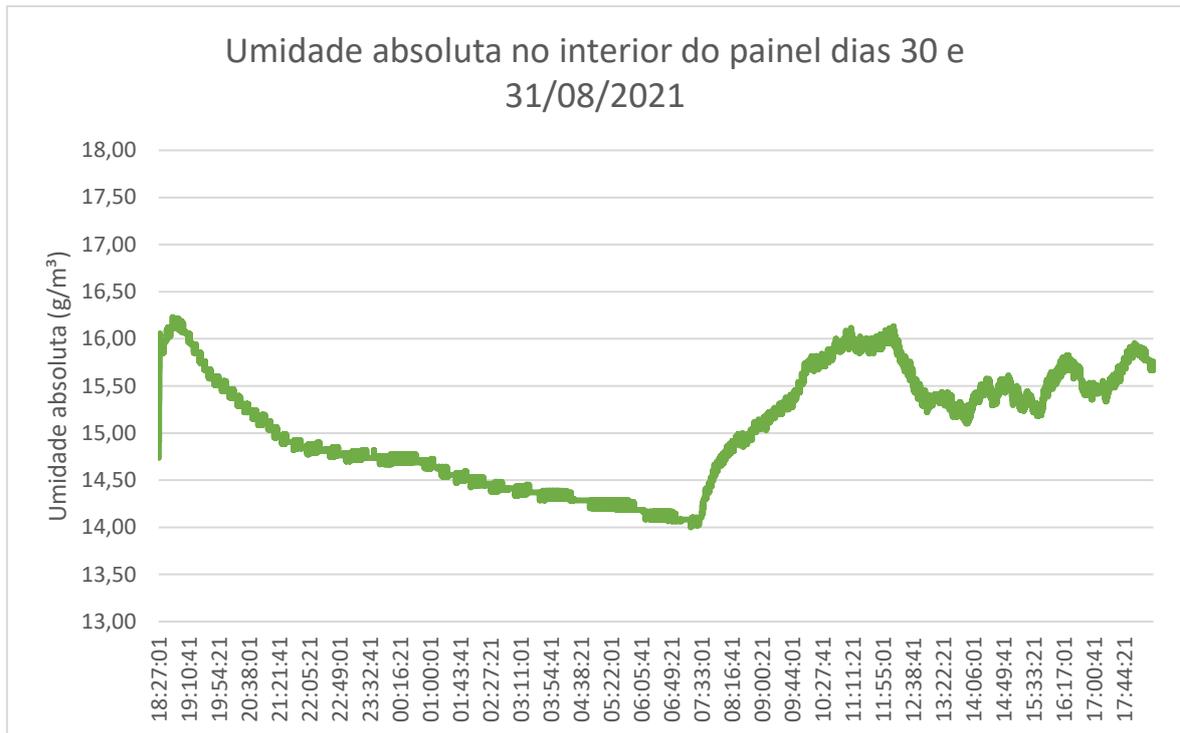
Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 11 - Medição de temperatura e umidade em cima do módulo Magazine nos dias 30 e 31/08/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

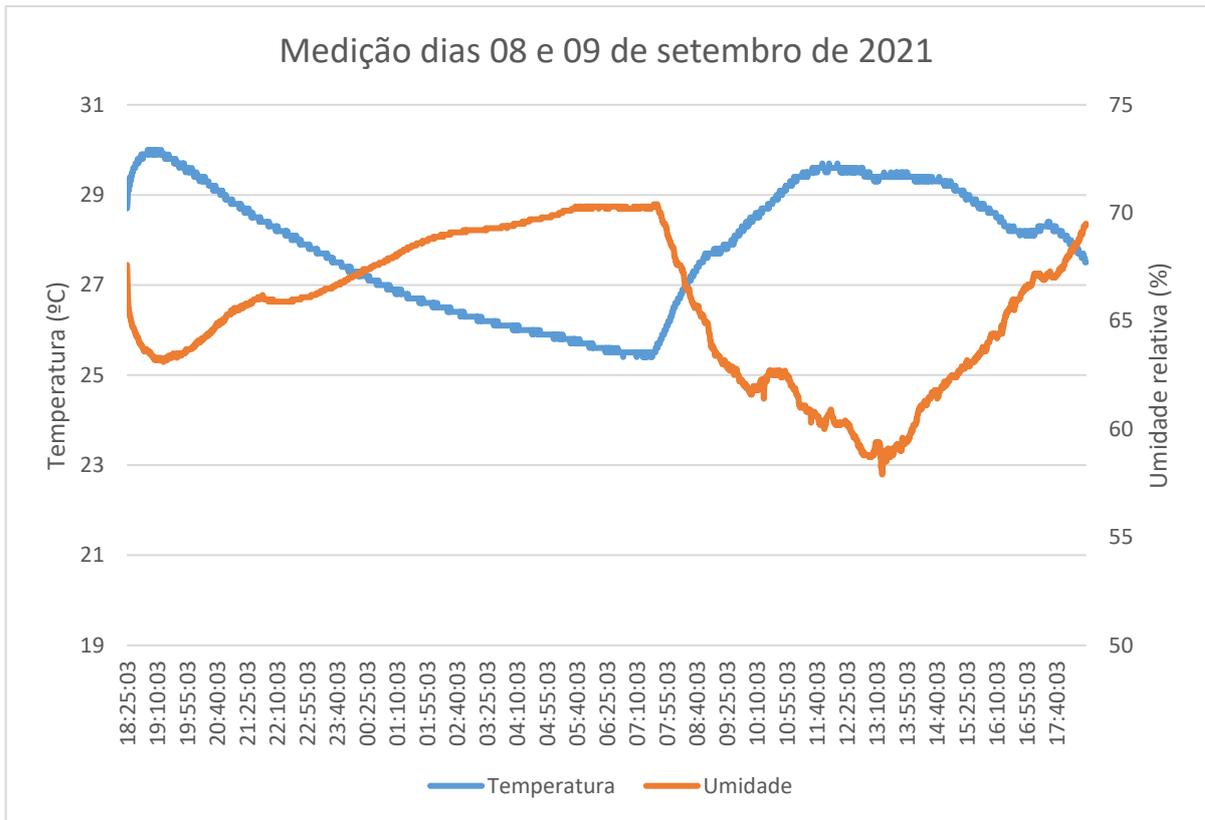
Gráfico 12 - Umidade absoluta no interior do painel nos dias 30 e 31/08/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

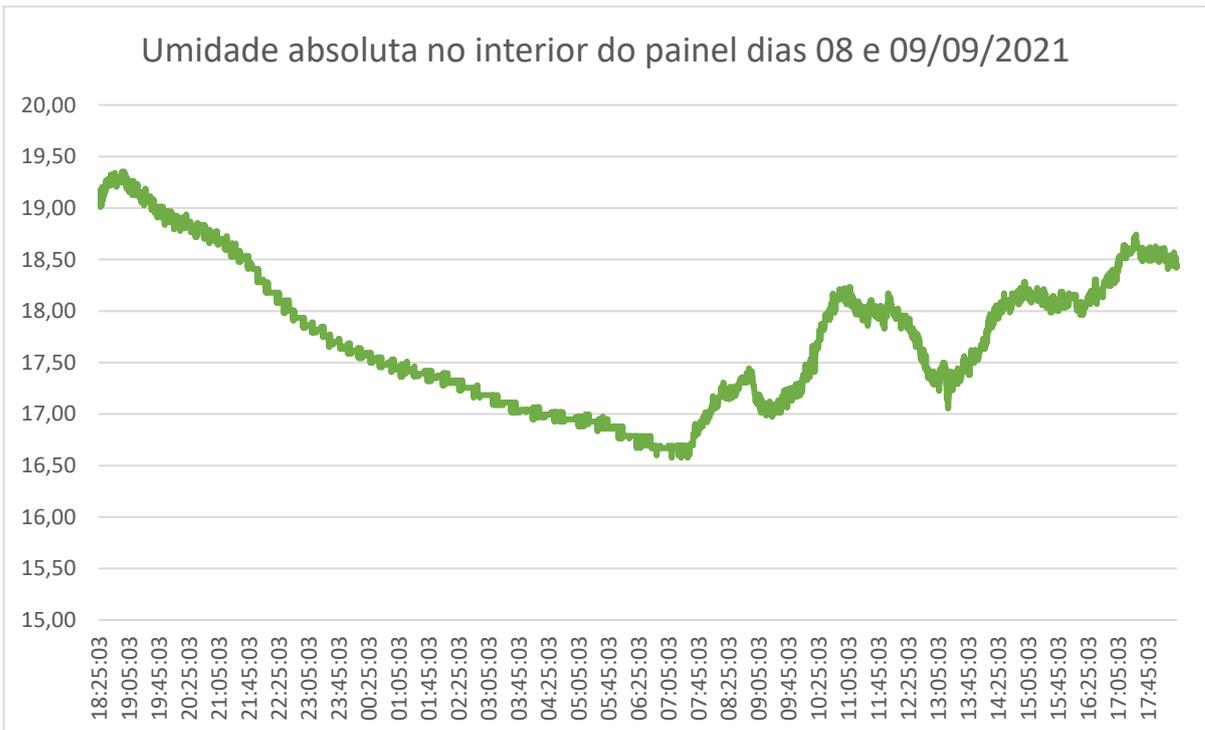
Para finalizar as medições foi feita uma última medição nos dias 8 e 9 de setembro de 2021 com o medidor no mesmo lugar mostrado na Figura 19. A medição foi realizada com início às 18:25:03 do dia 8 e fim às 18:24:33 do dia 9. As amostras foram gravadas em um intervalo de 30 segundos totalizando 2880 amostras coletadas. Os resultados dessa última medição são apresentados no Gráfico 13 e Gráfico 14.

Gráfico 13 - Medição de temperatura e umidade em cima do módulo Magazine nos dias 08 e 09/09/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 14 - Umidade absoluta no interior do painel nos dias 08 e 09/09/2021



Fonte: Produção do próprio autor.

As variações bruscas no início de todas as medições são devidas aos primeiros registros coletarem os dados da transição do *datalogger* de dentro da sua caixa até o local de medição, levando um intervalo de tempo até que ocorra o ajuste com os valores reais. Dessa forma os primeiros dados coletados de cada medição podem ser descartados para a análise.

Observa-se que a quantidade de massa de vapor d'água presente no volume de ar no interior do painel diminui ao longo de toda a noite, voltando a se elevar no início das atividades no galpão, por volta das 07:00. Nas medições é possível perceber uma queda nos valores absolutos de umidade nos períodos próximos ao almoço, quando a máquina para de operar, tornando a se elevar no restante do dia com a volta da operação.

Nos dados coletados na manhã do dia 30/07/2021, Gráfico 6, é possível ver uma queda brusca logo no início das atividades, seguido de um valor constante até o horário depois do almoço onde os valores absolutos de umidade voltam a cair bruscamente e depois aumentam até o fim da medição. O comportamento da curva se deve ao fato de, nesse dia em específico, a máquina ter apresentado o problema de partida a frio e com isso os operadores optaram por aplicar a secagem diretamente no módulo de potência, localizado na parte superior interna do painel, na tentativa de retirar a umidade, porém a ROMI D600 não partiu no período da manhã. Os operadores relataram que só foi possível iniciar a máquina após o período de almoço.

Nota-se que a umidade relativa nas medições realizadas no interior do painel atinge valores acima de 70% durante a madrugada. Na medição realizada nos dias 30 e 31 de outubro, Gráfico 11, a umidade relativa atingiu seus maiores valores, mantendo-se acima de 75% das 22:00 do dia 30 até a primeira hora de operação do dia seguinte. Foi visto nas seções anteriores que a permanência do módulo de potência em valores de umidade relativa próximos a 80% podem causar problemas de isolamento. A umidade relativa em valores elevados também indicam que o ar está próximo do seu ponto de saturação, isto é, próximo de começar a condensar.

As medições foram todas realizadas no inverno brasileiro, que ocorre entre 21 de junho e 23 de setembro, ou seja, quando a temperatura ambiente tende a ter valores mais amenos. Com isso não foi possível realizar medições em períodos muito quentes para que pudesse ser feita uma análise da máquina quando operando em temperaturas mais elevadas. Entretanto, pelos relatos fornecidos pelo proprietário e pelos operadores pode-se concluir com suficiente certeza de que

a temperatura interna do painel nos meses mais quentes do ano também é um problema. De acordo com o manual de operação do fabricante, o limite máximo permissível para temperatura interna do painel é de 40 °C.

No geral os gráficos mostram que durante os períodos em que a máquina está operante, uma grande quantidade de umidade é inserida no painel, tendo em vista que como o volume no interior do painel é constante, um aumento dos valores em g/m^3 descreve o aumento da quantidade de vapor d'água presente. Como já foi mencionado, durante a usinagem de peças é utilizada uma grande quantidade de água que atinge temperaturas muito altas, tornando-se vapor. Com isso, pode-se concluir analisando os gráficos que uma parcela da água que evapora no processo entra no painel. Sendo assim, a diminuição da umidade absoluta enquanto a máquina está em repouso, vista nos gráficos, indica que a água presente no ar está condensando sobre os dispositivos eletroeletrônicos.

5 CONCLUSÕES

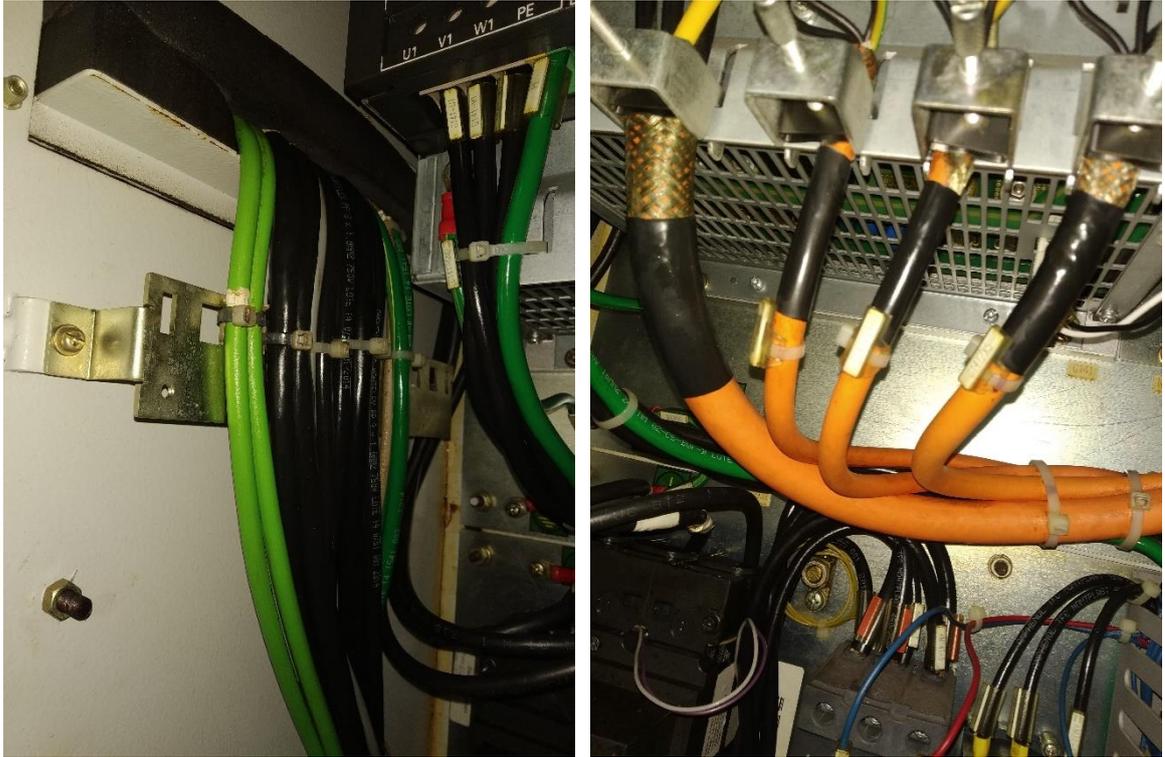
5.1 Soluções Propostas

No Capítulo 4 foram apontadas uma série de problemas encontrados nos tópicos de investigação abordados. Os principais fatores identificados que comprometem o funcionamento dos equipamentos eletroeletrônicos, podendo ocasionar na queima dos módulos e falhas operacionais da máquina são a presença de sujeira no painel, como óleo e partículas metálicas provenientes do processo de desbaste mecânico das peças metálicas e a condensação do ar úmido sobre os contatos elétricos e componentes eletrônicos.

Para evitar a queima do TRIAC, o ideal seria a existência de uma proteção compatível e de fácil substituição, como por exemplo os fusíveis ultrarrápidos, que atuam em casos de curto-circuitos e sobrecorrentes, protegendo dispositivos sensíveis como é o caso do TRIAC. Como a inserção de um novo componente eletrônico em uma placa de circuito impresso já produzida é de extrema complexidade, a solução para se evitar a queima de dispositivos é a adoção de boas práticas de limpeza, operação e manutenção.

Pautadas as questões sobre as condições nas quais o painel está inserido, conclui-se que é necessário primeiramente realizar uma limpeza completa no painel. Um teste utilizando álcool isopropílico foi realizado na máquina fora do horário de produção e os resultados se encontram na Figura 20 e Figura 21. O álcool isopropílico é próprio para a limpeza de módulos eletrônicos, podendo assim se realizar a limpeza do painel sem qualquer preocupação quanto a presença de prováveis contaminantes que podem estar contidos em outros produtos.

Figura 20 – Cabos elétricos após limpeza com álcool isopropílico



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Cabos elétricos após limpeza e papel com álcool isopropílico utilizado



Fonte: Produção do próprio autor.

Após efetuada a limpeza geral do painel, deverá ser realizada a vedação correta tanto da porta, quanto da passagem de cabos entre o painel e o compartimento operacional da máquina, impedindo que o ar contendo partículas suspensas e a névoa de vapor d'água carreando óleo adentrem o painel. Na porta deverá ser feita a troca da borracha e realinhamento da chapa para que a parte superior fique nivelada com a máquina, fechando a abertura superior. Na passagem de cabos citada deverá ser utilizada espuma expandida para que se possa reter a névoa de óleo. As práticas de limpeza e manutenções preventivas deverão tornar-se hábito, seguindo as indicações fornecidas pelo fabricante e o bom senso.

Para que haja um controle da temperatura e umidade interna ao painel, preservando assim a integridade de todos os dispositivos elétricos e eletrônicos e evitando também a abertura da porta causando a sua exposição a contaminantes e riscos de acidentes, e adicionalmente acabar com a prática da secagem dos módulos, a solução proposta que visa atender a todos esses requisitos é a da instalação de um ar-condicionado de painel, produto existente no mercado e recorrentemente aplicado em máquinas de centro de usinagem.

Foi verificado também que os condutores que fornecem a alimentação geral da máquina não atendem os níveis de corrente exigidos para uma operação segura. Com isso uma nova fiação com cabos de cobre de isolação EPR de 0,6/1 kV nas dimensões de 25 mm² deve ser lançada. Também deve ser substituído o disjuntor de proteção por um termomagnético de corrente nominal de 80 A, curva C com capacidade de interrupção de 5 kA (valor comercial próximo ao valor calculado).

5.2 Dimensionamento do ar-condicionado para painel elétrico

Para correto dimensionamento da potência do ar-condicionado de instalação em gabinete elétrico, os sites dos fabricantes do equipamento fornecem equações para realizar o cálculo ou o fazem de forma automática, de acordo com informações técnicas e de instalação. Algumas das informações em comum dos algoritmos de dimensionamento solicitadas pelos diferentes fabricantes são a temperatura ambiente, a temperatura de operação interna desejada e a potência dissipada pelos dispositivos instalados no interior do painel. Para a máquina em estudo, os equipamentos que dissipam uma quantidade considerável de calor estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Potência dissipada pelos dispositivos no interior do painel

Quantidade	Dispositivo	Modelo	Marca	Potência dissipada (W)
1	Módulo de potência	SINAMICS S120 Combi	Siemens	620
1	Fonte de alimentação 24 VDC	SITOP PSU200M	Siemens	18
1	Contator	LC1D65A	Shneider	10
1	Contator	LC1D12BL	Shneider	2
4	Contator	CAD50BL	Shneider	2

Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores das potências dissipadas foram retirados dos manuais de operação e dos *datasheets* dos dispositivos, com exceção dos contadores da Schneider dos quais não foi possível obter informação sobre a potência dissipada por eles. Dessa forma utilizou-se os valores de dispositivos equivalentes fornecidos por outros fabricantes. A soma das potências dissipadas pelos dispositivos foi de 658 W.

A máxima temperatura registrada nas medições no ambiente do galpão (ambiente externo ao painel) foi de 28,1 °C, porém como já mencionado, as medições foram realizadas apenas no inverno, ocorrendo temperaturas maiores na empresa durante o verão. Considerou-se então que a temperatura máxima do ambiente do galpão seja em torno de 40 °C. Para a temperatura interna desejada do painel, optou-se por escolher a temperatura de 25 °C, visto que grande parte dos componentes eletrônicos, como o caso do TRIAC BTA41 800B, tem seus parâmetros especificados para operação em temperatura ambiente de 25 °C. Realizou-se então o dimensionamento do aparelho de refrigeração de duas formas, a primeira utilizando-se de um cálculo com algoritmo automático e a segunda utilizando-se da equação fornecida pelo fabricante Helmo.

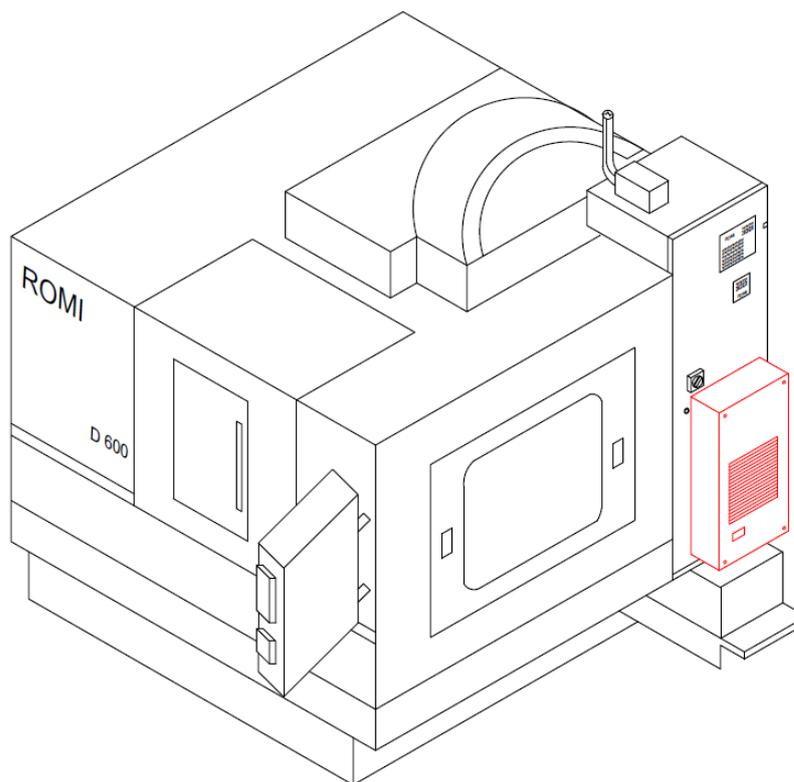
O primeiro dimensionamento foi realizado pelo site da *Kooltronic Enclosure Cooling Solutions*, empresa norte americana de equipamentos de climatização industrial, disponível em www.kooltronic.com/sizing. O processo consiste em 6 etapas até que o site retorne à potência necessária para as condições especificadas. O Apêndice A contém o passo a passo que foi seguido para obtenção dos resultados. O segundo dimensionamento foi realizado de acordo com equações fornecidas pela Helmo, uma empresa brasileira de sistemas de refrigeração de painéis. O equacionamento e o resultado obtido são observados no Apêndice B.

Com o dimensionamento indicado pelos dois fabricantes distintos, inclusive de países diferentes, conclui-se que um ar-condicionado na faixa de 1000 W atende a refrigeração do painel na temperatura especificada de 25 °C. Dessa forma o painel irá ser mantido, durante a operação, dentro de uma temperatura segura para a integridade de dispositivos eletrônicos. Sabendo que o equipamento funciona condensando o ar como resultado da refrigeração, será possível obter um controle da umidade no interior do painel, permanecendo esta em valores constantes e menores do que no ambiente externo, e assim evitando a condensação de vapor d'água nos dispositivos eletroeletrônicos em geral.

No Apêndice C pode ser visto o orçamento do ar-condicionado e o orçamento geral considerando a realização das soluções propostas. Percebe-se que o valor solicitado pela Helmo é bem inferior aos outros, tornando-se a opção mais atraente, adicionalmente motivado pelo fato de que um dos cálculos de dimensionamento realizados na análise ter sido fornecido pela própria empresa. As dimensões do ar-condicionado da Helmo e os desenhos de instalação no painel da ROMI D600 estão contidos no Apêndice D. A vista 3D da máquina de D600 após a instalação é apresentada na Figura 22.

As análises, orçamento, soluções encontradas e detalhes da instalação foram apresentadas ao proprietário que está analisando a possibilidade de realização do projeto.

Figura 22 – Detalhe 3D do centro de usinagem ROMI D600 com instalação do ar-condicionado Helmo



Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 Conclusões Finais

Em nota fiscal apresentada pelo proprietário do CNC, referente à aquisição e entrega de apenas um módulo de I/O, o valor total da compra foi de R\$8.619,00 reais. Já para a compra do módulo de acionamento do Magazine, incluindo os gastos com mão de obra, deslocamento, aquisição de novo módulo e hospedagem, totalizou um custo de R\$5.215,78 para a empresa. Além dos valores dos módulos, também há as perdas de produção devido a máquina parada no valor de R\$250,00/hora, conforme informado pelo proprietário. Comparando esses valores com o orçamento total de R\$9.395,07 do Apêndice C, a aquisição e instalação do ar-condicionado e a troca do circuito de alimentação e do dispositivo de proteção se justificam plenamente, se evitado a falha de pelo menos um módulo.

Pode-se concluir com as investigações que em um ambiente industrial agressivo, como os das indústrias de usinagem de peças mecânicas, a prática de ações relativamente simples, como as de manutenções preventivas e boas práticas de limpeza, podem evitar problemas maiores, a exemplo dos que ocorrem na máquina investigada e que motivou a realização desse presente

trabalho. Além disso, um correto dimensionamento das instalações elétricas e suas medidas de proteção promovem uma operação segura das máquinas e equipamentos, evitando que aconteçam problemas operacionais e conseqüentemente evitando-se também perdas para a empresa.

Buscar ajuda técnica qualificada é sempre recomendado para que seja feita uma identificação das causas raízes dos problemas, fornecendo uma rápida correção com tomadas de medidas simples que apresentem um baixo custo relativo para a empresa.

6 TRABALHOS FUTUROS

Com essa discordância encontrada entre o projeto executado e as normas pertinentes para aterramento e SPDA, além da falta de informações sobre os estudos da avaliação da necessidade de proteção através da análise de riscos, conforme NBR 5419 parte 2, assim como informação sobre a classe do SPDA prevista para o galpão, uma vez identificada a sua necessidade, aliadas com o grau de complexidade para realizar tais análises e elaborar um projeto de aterramento e SPDA, um estudo focado exclusivamente nessas questões pode ser realizado em projetos futuros, visando preservar o patrimônio da empresa através da elaboração de um projeto adequado contido nas normas vigentes da ABNT NBR.

Visto que a máquina investigada no escopo desse projeto apresentou um dimensionamento incorreto de condutores e dispositivos de proteção, estudos e projetos podem ser elaborados para as outras máquinas da empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, R. L.; QUOIRIN, N. S. R.; ARDJOMAND, L. M. **As Descargas Eletrostáticas e a Manutenção de Equipamentos Sensíveis no Âmbito do Setor Elétrico**. Curitiba: Instituto CGTI, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60898: Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 116 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 209 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-2: Proteção contra descargas atmosféricas Parte 2: Gerenciamento de risco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 104 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-3: Proteção contra descargas atmosféricas Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 51 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-4: Proteção contra descargas atmosféricas Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 87 p.

CASSIOLATO, César. **EMI – Interferência Eletromagnética**. Sertãozinho: Smar Equipamentos Industriais Ltda, 20--. Disponível em: <https://www.profibus.org.br/images/arquivo/pdf-6-543ec6bc451ff.pdf>. Acesso em 29 ago. 2021.

CAVALIN, Geraldo; CERVELIN, Severino. **Instalações Elétricas Prediais**. 14. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2006.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Grupo Editorial Nacional, 2013. 272 p.

FALCÃO, Eduardo Filipe de Carvalho Almeida. **Modelação Térmica de Placas de Circuito Impresso**. 2014. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Braga, 2014.

FERNANDES, José Maria Campos; SILVA, Andréia da. **Proteção de Placas Eletrônicas em Ambientes Agressivos**. Revista Científica Semana Acadêmica, Fortaleza, ano 18, 29 out. 2013. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/protecao-de-placas-eletronicas-em-ambientes-agressivos>. Acesso em 14 abr. 2021.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60364-5-52: Low-voltage electrical installations – Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems**. Genebra: IEC, 2011. 171 p.

MIRANDA, Jarbas Honorio de. (Coord.). **Capítulo 6: Umidade do Ar**. Apostila do Curso de Física do Ambiente Agrícola da Faculdade de Engenharia de Biosistemas da USP, 2016.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2017.

MEHL, Ewaldo Luiz de Mattos. **Conceitos Fundamentais sobre Placas de Circuito Impresso**. Curitiba: UFPR, 2011. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf. Acesso em 12 abr. 2021.

REBEYKA, Claudimir. **Comando Numérico Computadorizado**. 2008. Apostila do Curso de Programação CNC. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

REMSBURG, Ralph. **Thermal Design of Electronic Equipment**. 1. ed. Washington, D.C: CRC Press, 2001.

ROCHA, Joaquim. **Programação de CNC para Torno e Fresadora**. 1. ed. Lisboa: FCA – Editora de Informática, 2016. 368 p.

SILVA, Marcos Antônio da. **Avaliação de Parâmetros Técnicos e Econômicos na Substituição de Motores de Indução Trifásicos de 1 CV a 10 CV**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVA, Juarez de Souza e. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2008.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Recife: Versão digital, 2006. *E-book*. Disponível em: https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em: 20 ago. 2021.

VIMALA, J. Starlet; NATESAN, M.; RAJENDRAN, S. **Corrosion and Protection of Electronic Components in Different Environmental Conditions – An Overview**. Bentham Open, Tamilnadu, ano 27, v. 2, 02 abr. 2009. The Open Corrosion Journal, p. 105-113. Disponível em: <https://benthamopen.com/ABSTRACT/TOCORRJ-2-105>. Acesso em 25 abr. 2021.

WIERZBINSKI, Stanislaw. **SMD (Surface Mounted Devices) Repair**. Viena, Áustria: International Atomic Energy Agency, 1999.

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DE AR-CONDICIONADO ATRAVÉS DO ALGORITMO DA EMPRESA KOOLTRONIC

Etapa 1: Escolher as unidades de medida a serem utilizadas. Foram escolhidas as opções de graus Celsius para temperatura, Watts para potência e unidade métrica para comprimento.

Figura 23 – Escolha das unidades de medida

Product Sizing and Selection

Start > 1 > 2 > 3 > 4 > 5 > 6 > Finish

Please select the units that you would like to use...

Temperature	Heat Load	Measurements
<input type="radio"/> Fahrenheit	<input type="radio"/> BTU/H	<input type="radio"/> English (Inches)
<input checked="" type="radio"/> Celsius	<input checked="" type="radio"/> Watts	<input checked="" type="radio"/> Metric (MM)
		

Fonte: Kooltronic.

Etapa 2: Escolher a tensão de alimentação. A tensão de alimentação da ROMI D600 é trifásica, 220V entre as fases, frequência de 60Hz. Das opções apresentadas foi escolhida a de 230V por se tratar da tensão mais próxima da real.

Figura 24 – Escolha da tensão de alimentação

Product Sizing and Selection

Start > 1 > **2** > 3 > 4 > 5 > 6 > Finish

Please select the desired voltage(s)...

Voltage

115 volt 50/60Hz

230 volt 50/60Hz

480 volt

12 VDC

24 VDC

48 VDC



<< Previous Next >>

Fonte: Kooltronic.

Etapa 3: A terceira etapa é dividida em três partes, todas referentes a especificação da estrutura do painel elétrico o qual se deseja refrigerar. Na primeira parte, Figura 25, foi solicitado a classificação NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), que se trata de um órgão de normalização com sede em Washington, Estados Unidos. A classificação NEMA solicitado faz referência ao grau de proteção de influências externas ao painel, tais como chuva e poeira. O grau de proteção escolhido, levando em conta a vedação a ser feita na porta do painel para instalação do ar-condicionado foi a NEMA 12 que corresponde a um painel de uso interno a edificação e sem aberturas, com proteção dos equipamentos internos contra partículas sólidas presentes no ar como a poeira e fibras, também fornecendo proteção aos equipamentos internos aos efeitos nocivos relacionados a entrada de água ou gotejamento de fluidos não corrosivos (NEMA 250-2003). Na Figura 26 foi escolhido o painel vedado, e na Figura 27 a opção de utilizar o aparelho de ar-condicionado para refrigeração do painel.

Figura 25 – Escolha dos parâmetros do painel elétrico – Parte 1

Product Sizing and Selection



Please select the protection level that is required...

NEMA Interface Rating

Indoor/Outdoor

- NEMA 4X** (Exposed to corrosive agents, washdowns and splashing water)
- NEMA 4** (Washdowns and splashing water)
- NEMA 3R** (Falling water and light splashing)



Indoor Only

- NEMA 12** (Falling water and light splashing)

Hazardous Locations UL 496

- NEMA 7 & 8** (Class I, Division 1, Groups A, B, C, or D)

Not Required/Applicable

- None** (NEMA Rating not required)

<< Previous

Next >>

Fonte: Kooltronic.

Figura 26 – Escolha entre painel vedado ou com ventilação

Product Sizing and Selection



Is the enclosure sealed or vented?

Enclosure Type:

- Enclosure is sealed**
- Enclosure is vented to surrounding air**



<< Previous

Next >>

Fonte: Kooltronic.

Figura 27 – Escolha do tipo de equipamento a ser utilizado

Product Sizing and Selection

Please select the type of cooling products to search...

Products:

(Some product selections hidden due to previously specified requirements)

- All Cooling Products
- Air Conditioners
- Heat Exchangers



<< Previous

Next >>

Fonte: Kooltronic.

Etapa 4: Fornecer as dimensões do painel, lados do painel onde ocorre transferência de calor e local de montagem do ar-condicionado (Figura 28): As dimensões de painel são de 170 cm de altura, 55 cm de largura e 50 cm de profundidade. Para as superfícies de transferência de calor foram marcadas todas as extremidades do painel, considerando que há tanto troca de calor entre as chapas metálicas do painel com o ambiente externo quanto com o interior da máquina CNC, onde ocorre o processo de usinagem. A instalação do aparelho de refrigeração só é possível ser feita na porta do painel, visto que a parte de trás e a lateral esquerda estão voltados para o interior da máquina enquanto a lateral direita contém a maioria dos módulos eletrônicos e a parte superior não possui área suficiente para instalação.

Figura 28 – Etapa 4 do dimensionamento do ar-condicionado para painel elétrico

Product Sizing and Selection**Please describe the enclosure...**Dimensions:Height: (mm)Width: (mm)Depth: (mm)Cooling unit mounting location:

- Front/Back
- Side
- Top
- Internal
- Internal (Rack-Mount)

Surfaces allowing heat transfer:

- Front
- Back
- Left Side
- Right Side
- Top
- Bottom

<< Previous

Next >>

Fonte: Kooltronic.

Etapa 5: Fornecer o local de operação do painel, temperaturas máximas do ambiente externo e do interior do painel: A temperatura máxima do ambiente externo foi definida em 40 °C e a máxima do interior do painel em 25 °C, vide Figura 29.

Figura 29 – Especificação das temperaturas máximas de operação

Product Sizing and Selection**Temperatures...**Operating Temperatures

Max. ambient temperature:

 (°C) ⓘ

Max. internal enclosure temperature:

 (°C) ⓘInsulation

Enclosure insulation R value:

 ▾Cabinet Location Indoors Outdoors

<< Previous

Next >>

Fonte: Kooltronic.

Etapa 6 (Figura 30): Para finalizar as informações e seleções de parâmetros do algoritmo de cálculo de potência de refrigeração do ar-condicionado a ser utilizado, foi solicitado na última etapa o calor dissipado pelos dispositivos internos do painel. Os dispositivos que dissipam uma quantidade considerável de calor presentes no painel elétrico são listados na Tabela 9.

Figura 30 – Etapa final do algoritmo
Product Sizing and Selection

Start > 1 > 2 > 3 > 4 > 5 > 6 > Finish

Heat Load...

Internal Heat Load

Watts

[Help Me Calculate My Heat Load](#)



<< Previous Next >>

Fonte: Kooltronic.

Após a inserção dos dados das potências dissipadas dentro do painel, o site da *Kooltronic* forneceu a potência requerida do ar-condicionado a ser instalado no painel elétrico em BTU/h, conforme Figura 31, que foi convertido em Watts através da equação (23) onde P_{arw} corresponde à potência do equipamento em Watts e $P_{arBTU/h}$ a potência em BTU/h.

$$P_{arw} = \frac{P_{arBTU/h}}{3,414} \quad (23)$$

Figura 31 – Resultado final do dimensionamento do ar-condicionado
Product Sizing and Selection



Sizing and Selections Results...

Print

Volts: 230
 NEMA Rating: NEMA 12
 Enclosure Type: Sealed
 Products Searched: Air Conditioners
 Enclosure
 Dimensions: 1700mm H x 550mm W x 500mm D
 Mounting Location: Front/Back
 Open Surfaces: Front, Back, Left Side, Right Side, Top, Bottom
 Maximum Ambient Temperature: 40°C
 Maximum Allowable Internal Temperature: 25°C
 Insulation R Value: 0
 Cabinet Location: Indoors
 Heat Load: 658 Watts

Cooling Required: 3311 BTU/H

Fonte: Kooltronic.

Utilizando o valor especificado pelo site e a equação (23) tem-se, transformando de BTU/h para

$$\text{Watt, } P_{arw} = \frac{3311}{3,414} = 970 \text{ W.}$$

APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DE AR-CONDICIONADO ATRAVÉS DO ALGORITMO DA EMPRESA HELMO

As equações fornecidas pela Helmo e os cálculos para realizar o dimensionamento do ar-condicionado para painel são apresentados abaixo.

$$Q_t = Q_d + Q_a \quad (24)$$

Onde:

Q_t – Carga térmica total, em Watts;

Q_d – Somatória das potências dissipadas no interior do painel, em Watts;

Q_a – Potência absorvida do ambiente, conforme equação (25), em Watts.

$$Q_a = k \cdot S_s \cdot \Delta t \quad (25)$$

Onde:

k – Coeficiente de transmissão de calor ($k = 5,5$ para chapa de aço), em $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

S_s – Área da superfície do painel, conforme equação (26), em m^2 ;

Δt – Diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura interna do painel desejada.

$$S_s = 1,8 \cdot A \cdot (L + P) + 1,4 \cdot L \cdot P \quad (26)$$

Onde:

A – Altura do painel, em metros;

L – Largura do painel, em metros;

P – Profundidade do painel, em metros.

Assim, na equação (26), para as dimensões do painel de $A = 1,7m$; $L = 0,55m$ e $P = 0,50m$, obtém-se:

$$S = 1,8 \cdot 1,7 \cdot (0,55 + 0,50) + 1,4 \cdot 0,55 \cdot 0,50 = 3,598 \text{ m}^2 \quad (27)$$

Substituindo S na equação (25), e utilizando os mesmos valores de temperaturas máximas do ambiente e no interior do painel, tem-se:

$$Q_a = 5,5.3,598. \Delta t = 19,789. (40 - 25) = 296,835 W \quad (28)$$

Foi visto na Tabela 9 que a potência de dissipação é de $Q_a = 658 W$, então, pela equação (24), temos o seguinte resultado para o dimensionamento da potência do ar-condicionado definido pela Helmo:

$$Q_t = 296,835 + 658 = 954,835 W \quad (29)$$

APÊNDICE C – ORÇAMENTO

Para verificar a viabilidade da compra do ar-condicionado com potência de operação de 1000W, inicialmente foi realizado contato com a ROMI pois na compra das máquinas de centro de usinagem há a opção de incluir o equipamento de refrigeração. Todavia, o valor da cotação apresentado pelo representante da ROMI se mostrou proibitivo e muito acima dos demais fornecedores.

Buscou-se então outras opções de fornecedores, solicitando o orçamento para empresas que trabalham exclusivamente com sistemas de refrigeração de painéis elétricos em geral. Dessa forma foram realizados três orçamentos com diferentes fabricantes. Os orçamentos fornecidos para aquisição do ar-condicionado, com impostos e frete inclusos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Orçamento do ar-condicionado

Fabricante	Potência	Tensão	Gás refrigerante	Preço
Composul	1070W	220V	R134a	R\$9.002,00
Helmo	1000W	220V	R134a	R\$6.100,00
Pfannenber	1000W	220V	R134a	R\$9.803,05

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: A empresa Composul não possui o equipamento na potência de 1000W.

Como o ar-condicionado escolhido possui potência de 1000W e tensão de alimentação de 220V, a corrente que irá circular pelos condutores será de 4,45 A. Os cabos utilizados para alimentação podem então ser com dimensões de 2,5 mm² e isolação em PVC de 750 V, os quais possuem uma capacidade de condução de corrente de 24 A. O dispositivo de proteção a ser utilizado visando a proteção dos cabos contra sobrecorrentes deverá ser um disjuntor termomagnético bipolar de 16 A.

A Tabela 11 apresenta o valor total do orçamento contendo os insumos referentes a instalação do ar-condicionado e da troca dos condutores e dispositivo de proteção do circuito de alimentação da D600. Os preços dos materiais, com exceção do ar-condicionado de painel, foram retirados do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção

Civil), ferramenta utilizada pela Administração Pública Federal para definir valores de insumos e serviços e do IOPEs (Instituto de Obras Públicas do Estado do Espírito Santo) órgão com atuação voltada para serviços de engenharia e construção públicas. Os custos referentes a mão de obra em geral não foram considerados, visto que a empresa em estudo possui equipe capaz de efetuar as instalações e as adequações necessárias. A empresa também já possui o álcool isopropílico, as espumas expansivas e a borracha e ferramentas necessárias para a vedação do painel.

Tabela 11 - Orçamento geral

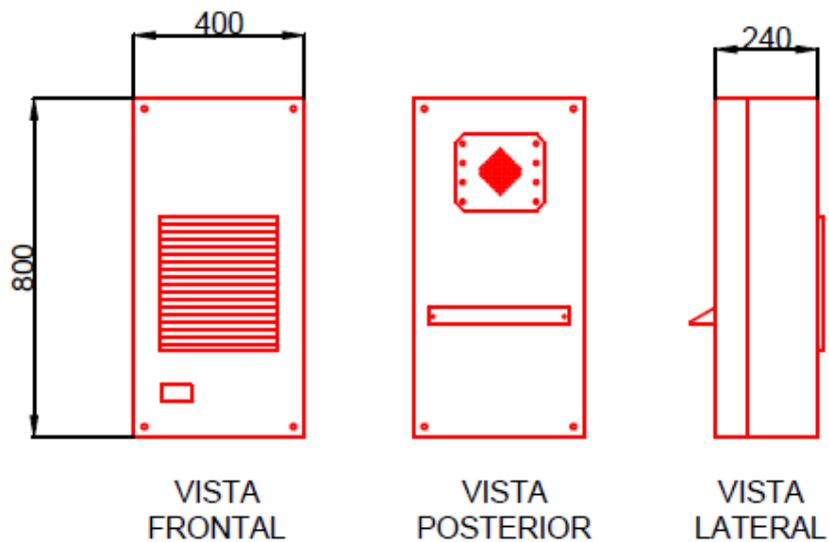
Órgão / Fabricante	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Preço total
Helmo	Ar-condicionado para painel elétrico – 1000W/220V	UND	1	R\$6.100,00	R\$6.100,00
SINAPI	Disjuntor tipo DIN/IEC, bipolar de 6 até 32A	UND	1	R\$45,05	R\$45,05
IOPEs	Disjuntor tripolar 80A	UND	1	R\$119,83	R\$119,83
IOPEs	Cabo flexível isolamento termoplástica 750v - 2,5 mm ² - 70°	M	3	R\$2,73	R\$8,19
IOPEs	Cabo flexível isolamento EPR 0,6/1kV - 25 mm ² - 70°	M	100	R\$31,22	R\$3122,00
VALOR TOTAL:					R\$9395,07

Fonte: Produção do próprio autor.

APÊNDICE D – DESENHOS DE INSTALAÇÃO DO AR-CONDICIONADO

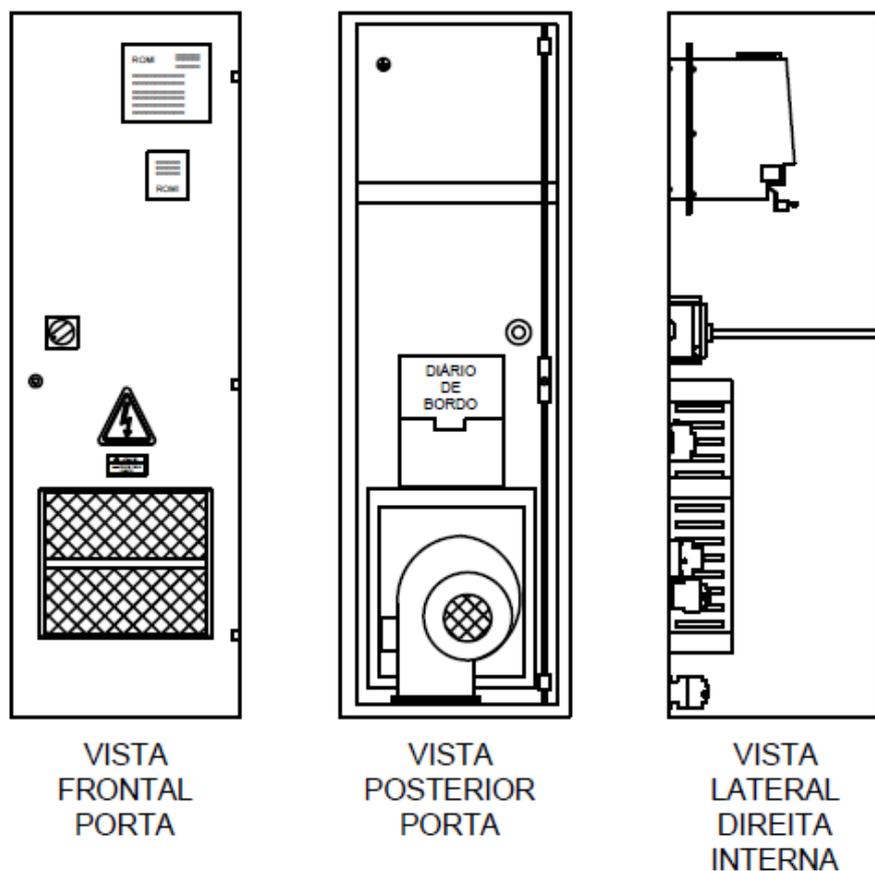
As dimensões do ar-condicionado da Helmo de 1000W estão especificadas no desenho da Figura 32. O único local possível do painel para instalação do equipamento é na sua porta que também possui um espaço disponível reduzido devido a presença do disjuntor geral e da trava de segurança que estão localizados na parte esquerda da porta em uma altura média em relação a borda inferior, conforme visto no desenho na Figura 33. Para elaboração dos desenhos das vistas, medições foram realizadas no local de forma a garantir que o ar-condicionado poderá ser instalado sem que haja interferências na instalação.

Figura 32 – Ar-condicionado para painel 1000W da Helmo



Fonte: Produção do próprio autor.
Nota: Cotas em milímetros.

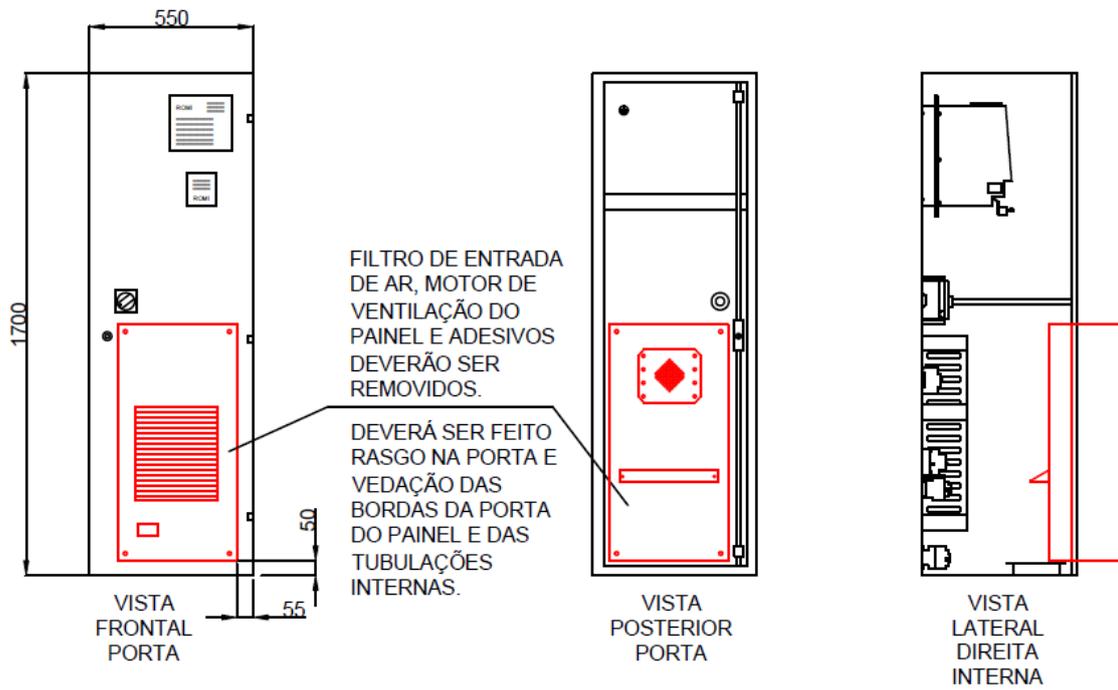
Figura 33 – Detalhe das vistas da porta e lateral interna do painel



Fonte: Produção do próprio autor.

Com a instalação do novo equipamento de refrigeração, a utilização do motor para ventilação forçada, assim como a necessidade do filtro de ar, tornam-se dispensáveis, podendo ceder seu espaço para fixação do ar-condicionado. Sendo assim, serão necessários a retirada das soldas das placas de fixação da carcaça contendo o motor, localizada na parte posterior da porta e a retirada do filtro. Um novo rasgo na chapa de aço também será necessário para instalação do ar-condicionado. O detalhamento das vistas do painel é apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Detalhe das vistas da porta e lateral interna do painel com instalação do ar-condicionado Helmo



Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: Cotas em milímetros.