

Desenvolvimento de sistema de reaproveitamento de calor para estufa industrial

DA SILVA DE BEM, Adélcio
Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
adelcio.b17@aluno.ifsc.edu.br

TURAZI, Almir
Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
almir.turazi@ifsc.edu.br

BATISTA DE SOUZA, Giovani
Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
giovanisouza@ifsc.edu.br

Resumo — Motores elétricos são equipamentos industriais que necessitam de condições adequadas de funcionamento para garantir maior durabilidade. Uma das principais causas de danos destes equipamentos é o derretimento do isolamento das bobinas, oriundos de superaquecimento. Deste modo torna-se crucial o controle da temperatura no ambiente de trabalho onde estão instalados. Uma das formas de resfriamento de ambientes industriais é a troca de calor via exaustão, transferindo a massa de ar quente de dentro para fora do local. O presente trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de reaproveitamento de calor da sala de máquinas de uma empresa da região de Criciúma/ SC. Neste local constatou-se que a temperatura ambiente apresentava picos de temperatura de aproximadamente 60°C, podendo, ocasionar avaria da isolação das bobinas dos motores. Esta empresa realiza, também, reparos de inversores de frequência e soft starters, necessitando de uma estufa para secagem destes equipamentos eletrônicos. Deste modo aplicar a massa de calor deslocando da sala de máquinas para a sala de estufa localizadas lado a lado na empresa. Com a utilização da metodologia PRODIP (Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos), foi desenvolvido um mecanismo de controle da temperatura das duas salas, incluindo um exaustor na parede entre as salas, que é acionado quando a temperatura da sala de máquinas atingir um nível crítico. Já a temperatura da estufa é controlada para manter o ambiente propício para secagem dos equipamentos, e conta, também, com um secador elétrico para garantir o aquecimento quando necessário. Como resultado do projeto, foi implementado um protótipo do controlador utilizando o microcontrolador ATmega328P. Esse controlador incorpora dois sistemas distintos, um para controle da estufa, onde foi desenvolvido um controlador proporcional-integral (PI), com parâmetros obtidos a partir de valores comerciais projetados especificamente para aplicações térmicas, e outro para a sala de máquinas, onde foi adotado um controle do tipo ON/OFF, responsável pelo acionamento do exaustor. Após testes, o sistema de controle desenvolvido foi capaz de manter a temperatura no *setpoint* selecionado com baixa oscilação.

Palavras-chave: Controlador de temperatura, Transferência de calor, Reaproveitamento de calor.

I. INTRODUÇÃO

A automação nos últimos anos possibilitou um grande crescimento das indústrias devido ao desenvolvimento de componentes e equipamentos que se tornaram fundamentais para o controle de processos [1]. Os motores elétricos, por exemplo, são essenciais nos processos industriais, convertendo energia elétrica em mecânica para movimentar dispositivos. Existem diferentes tipos de motores, como os de corrente alternada (CA), corrente contínua (CC), síncronos e de indução [2].

Na indústria, os motores elétricos consomem 75% da eletricidade, e os motores de indução trifásicos são responsáveis por 90% desse consumo. Para o controle

eficiente dos motores, são usados dispositivos como inversores de frequência e *soft starters*, que controlam a velocidade e a corrente de partida. Esses dispositivos, desenvolvidos com eletrônica de potência, oferecem vantagens em termos de custo e manutenção. Inversores de frequência permitem o controle preciso da velocidade e do torque dos motores de indução, trazendo benefícios para a eficiência energética e flexibilidade no processo industrial. [3].

No geral, os inversores são equipamentos eletrônicos considerados como tecnologia de ponta para controle de motores de indução trifásicos. Eles são capazes de variar a velocidade do motor sem perder o torque, respeitando a característica tensão/frequência [4].

Já as *soft starters* são equipamentos destinados à aceleração, desaceleração e proteção dos motores de indução trifásicos e permitem um controle de partida e parada suave, da tensão de alimentação dos motores, minimizando as elevadas correntes de partida. São comumente empregadas em bombas centrífugas (saneamento/ irrigação/ petróleo), motores que possuem uma elevada corrente de partida [5].

Uma grande desvantagem do controle dos motores de indução por meio de inversor de frequência é a possibilidade de aumento da temperatura em relação aos motores acionados por partida direta. Esse superaquecimento ocorre devido às perdas causadas pelos componentes de alta frequência do sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) gerado pelo inversor, podendo acarretar em redução da vida útil dos motores [6].

Para evitar danos prematuros, o controle da temperatura dos motores elétricos torna-se crucial. Para este controle utilizam-se métodos de transferência de calor. Esta troca de calor é um processo fundamental em várias aplicações práticas. É definida como a transferência de energia térmica de um corpo para outro em diferentes temperaturas, até que as temperaturas se igualem. Esse processo pode ocorrer de três maneiras: convecção, radiação e condução [7].

O processo de convecção pode ser representado conforme mostrado na Fig. 1. Trata-se da representação de um fluido em movimento com velocidade (u_{∞}) sobre a superfície de um sólido a uma temperatura (T_p). O processo de troca de calor (convecção) ocorre com a transferência de calor da superfície para o fluido, que possui uma temperatura menor (T_{∞}) [7].

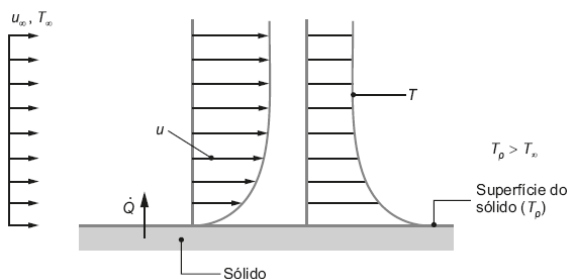


Fig. 1. Transferência de calor por convecção.

A radiação térmica é um mecanismo físico da transferência de calor, que pode ser transferida na forma de ondas eletromagnéticas ou de fótons que depende do meio físico adotado. Na radiação térmica independente do padrão usado, a transferência de calor não precisa do meio físico para se propagar. Um corpo negro irradia a máxima radiação térmica possível a uma dada temperatura. Além disso, o corpo absorve toda a radiação térmica incidente [7].

Já a condução, em gases e líquidos, ocorre pela transferência de calor da área de maior temperatura para menor temperatura, ou seja, a energia térmica é transferida pelo choque das moléculas mais energéticas para menos energéticas. Já em sólidos a transferência ocorre por meio de vibrações e, pelo deslocamento dos elétrons livres [7].

A troca de calor realizada entre dois ambientes, que ocorre com o deslocamento de massa de ar de um local para outro, ocorre por condução. Este é o caso estudado neste trabalho e, considerando-se o balanço de energia, a quantidade de calor perdida no ambiente 1 é a mesma que será ganha no ambiente 2:

$$Q_{perdido} = Q_{ganho} \quad (1)$$

Sendo assim:

$$\text{Se } Q = mc\Delta T \quad (2)$$

Onde: Q é a quantidade de calor (J); m é a massa (kg); c é o calor específico (J/kg °C); ΔT é a variação de temperatura (°C).

Temos que:

$$m_1 c_{ar} (T_{i1} - T_{eq}) = m_2 c_{ar} (T_{i2} - T_{eq}) \quad (3)$$

Onde: c_{ar} é o calor específico do ar; T_{i1} é a temperatura inicial da sala de máquina; T_{eq} é a temperatura de equilíbrio das duas salas; T_{i2} é a temperatura inicial da sala de estufa. Deste modo é possível a determinação da temperatura de equilíbrio entre os ambientes [7]:

$$\text{Como } \rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho V_1 (T_{i1} - T_{eq}) = \rho V_2 (T_{i2} - T_{eq})$$

$$V_1 (T_{i1} - T_{eq}) = V_2 (T_{i2} - T_{eq})$$

$$V_1 T_{i1} - V_1 T_{eq} = V_2 T_{i2} - V_2 T_{eq}$$

$$T_{eq} (V_1 - V_2) = V_1 T_{i1} - V_2 T_{i2}$$

$$T_{eq} = \frac{V_1 T_{i1} - V_2 T_{i2}}{V_1 - V_2} \quad (4)$$

Onde: ρ é a densidade; V_1 é o volume de ar da sala de máquina; V_2 é o volume de ar da sala de estufa.

Uma das formas de transferir massa de ar de um ambiente para outro é a utilização de extractores de ar. Estes são equipamentos que podem ser aplicados tanto para remover gases e odores indesejados, mas também para resfriar um ambiente. São mais eficazes em locais onde o ar-condicionado não pode ser usado, como armazéns industriais ou espaços ao ar livre [8].

A ideia por trás do uso dos exaustores para resfriar uma sala é simples: o ar quente dentro da sala é exaurido pelo exaustor, criando um vácuo que atrai o ar frio de fora. Esse ar fresco, por sua vez, ajuda a baixar a temperatura do ambiente. Na escolha do exaustor, é importante lembrar que o uso de exaustor para resfriamento é mais eficiente em lugares onde a temperatura externa é menor que a interna e em locais com clima seco. Além disso, é importante posicionar o exaustor corretamente para resfriar o ambiente com eficiência. O ventilador deve ser instalado na parte superior de forma que permita a saída do ar quente e a entrada do ar frio [9].

Para permitir o controle destes equipamentos são utilizados componentes eletrônicos. Estes são encontrados em várias aplicações, como controle de temperatura, pressão, nível, vazão, pH, condutância, entre outras. No geral, os controladores são utilizados para controlar, gerenciar e monitorar dispositivos e procedimentos industriais e, dependendo da sua aplicação e do princípio de funcionamento, podem ser classificados em diferentes grupos [10].

Por exemplo, os controladores do tipo On/Off são os controles mais simples e usuais. Eles agem como interruptores para ligar ou desligar o sistema se a variável medida assumir um determinado valor de referência [11].

Já os controladores Proporcionais-Integrais-Derivativos (PID) são os mais utilizados na indústria. Eles ajustam o valor da saída para mantê-la o mais próxima possível do valor desejado (setpoint). O controlador atua sobre o erro do sistema, definido como a diferença entre o valor desejado e o valor medido. O comportamento do controlador é ajustado por meio de três ganhos: proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativo (Kd). Cada um deles desempenha um papel específico na correção do erro [11].

O ganho proporcional gera uma ação de controle proporcional ao erro instantâneo, ou seja, quanto maior o erro, maior será a ação corretiva aplicada pelo controlador. Porém, um valor excessivamente alto de Kp pode provocar oscilações acentuadas e até instabilidade no sistema [11].

O ganho integral é responsável por corrigir erros que persistem ao longo do tempo. Ele atua sobre o erro acumulado, eliminando o erro em regime permanente. Entretanto, um valor elevado de Ki pode tornar a resposta do sistema mais lenta ou causar oscilações devido ao excesso da ação integrativa [11].

Por fim, o ganho derivativo considera a taxa de variação do erro, funcionando como um elemento preditivo. Ele reage

à velocidade com que o erro está mudando, suavizando a resposta do sistema e reduzindo oscilações. Na prática, o Kd atua como um amortecedor, contribuindo para maior estabilidade dinâmica. [11].

Tem-se, ainda, o controlador proporcional-integral (PI), que é uma aplicação particular do PID, com ganhos proporcionais e integrativos, que permite um controle rápido com erro zero em regime permanente [11].

A verificação da temperatura pode ser realizada por sensores mecânicos e elétricos. Os principais sensores mecânicos são os bimetálicos, já os principais sensores elétricos são os termopares. Termopares geram corrente proporcional à diferença térmica entre junções e são econômicos, mas sofrem desgaste e contaminação. Tipos comuns (E, J, K, T) oferecem opções para diferentes faixas de medição [12].

Para o desenvolvimento de um sistema de controle, unindo cada componente explanado neste trabalho, faz-se necessário o uso de ferramentas de gestão de projetos. O PDP (Processo de Desenvolvimento de Produtos), traz uma visão geral de um modelo de referência e estrutura-se destacando três macro fases de atividades distintas [13]:

i) Pré desenvolvimento: Diz respeito à concepção inicial do produto, onde ideias são reunidas, restrições são avaliadas e é realizado o planejamento estratégico tanto para o produto quanto para o projeto.

ii) Desenvolvimento: O produto efetivamente começa a ser produzido, começando com a definição de todas as especificações e metas necessárias.

ii) Pós-Desenvolvimento: O lançamento do produto, a fase de pós-desenvolvimento se concentra no acompanhamento do produto no mercado.

Já o Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos, conhecido como PRODIP, auxilia no processo de desenvolvimento de produtos, trazendo uma abordagem mais cordial [13]. O processo é decomposto em fases, seguindo uma sequência lógica de ações, conforme ilustrado na Fig. 2.

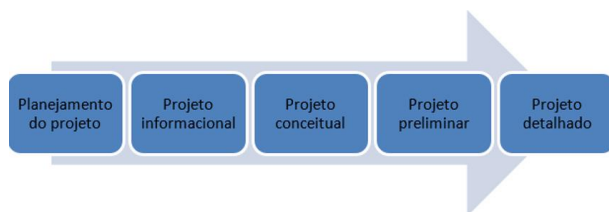


Fig. 2. Modelo de Referência PRODIP.

Para efetivamente desenvolver um produto com eficiência, é essencial ter um entendimento claro do que precisa ser feito e como realizá-lo. Para alcançar esse objetivo, é imprescindível adotar uma metodologia de projeto que englobe conhecimentos, métodos e ferramentas capazes de apoiar todo o processo de desenvolvimento de produtos [14].

O problema abordado neste trabalho, e onde foram aplicados os métodos de gestão de projetos, trata da rotina de uma empresa instalada na região de Criciúma. Esta empresa realiza o reparo de inversores de frequência e soft starters e a demanda por este serviço abrange diversas áreas (empresas da região) com aplicações distintas para estes componentes. Um dos exemplos de aplicação é no funcionamento de moedores,

onde o inversor de frequência realiza um controle do motor mantendo velocidade constante com um torque elevado.

Nesta empresa reparadora, há uma sala de máquina com 14 motores no total com potência entre 1CV há 30CV. No geral, cerca de 9 motores ficam ligados 9 horas por dia. Ao final do dia esta sala atinge cerca de 60°C. Baseando-se em instruções de um dos fabricantes, que diz que os motores que utilizam as classes de isolamento B (130 °C), F (155 °C) e H (180 °C) são projetados para trabalhar em um ambiente com temperatura de até 40°C em uma altitude de até 1000 m, nota-se que a sala em questão trabalha em temperaturas muito superiores à recomendada. O trabalho constante nessa temperatura, eventualmente, pode levar a problemas no funcionamento como derretimento dos isolamentos das bobinas dos motores, por exemplo [15].

Com vista a conservação da vida útil desses equipamentos, há a necessidade de melhorar a temperatura da sala de máquinas através da implantação de um sistema para transferência de calor de dentro da sala para outro ambiente.

Outra característica da empresa que realiza estes reparos é que a técnica utilizada para realização destas manutenções de inversores de frequência e *soft starters*, na maioria das vezes, necessita de uma pré-lavagem e secagem do equipamento, pois muitas vezes os equipamentos acumulam muita sujeira ou até mesmo carbonização na placa. Atualmente, os inversores e *soft starters* mais robustos possuem cerca de 1,50 m de altura, portanto suas carcaças não cabem em estufas convencionais. Sendo assim, tem-se a necessidade de uma sala de estufa para realização destas operações.

Para a realização convencional da secagem de uma carcaça dos equipamentos citados, utilizando-se aquecedor elétrico, estima-se um excesso de energia consumida em função da grande área a ser seca. Sendo assim, utilizar um sistema de transferência de calor da sala de máquinas para sala da estufa, reduziria a diferença de temperatura a ser controlada pelos aquecedores convencionais.

O objetivo deste trabalho, portanto, é executar o projeto e desenvolver um protótipo de um sistema para controle das temperaturas entre as duas salas citadas (sala de máquinas e sala de estufa) através de reaproveitamento de calor (transferência de massa de ar de uma sala para outra). Para isso, definiu-se como objetivos específicos:

- Estudar a viabilidade do sistema de reaproveitamento de calor;
- Definir estrutura física necessária para transferência de massa de ar e aquecimento da sala de estufa;
- Implementar um controlador para manter as temperaturas das duas salas dentro das faixas necessárias para a empresa;
- Desenvolver o hardware do controlador;
- Desenvolver o código, onde será realizado o controle da temperatura das duas salas e a interação do sistema com o usuário;
- Desenvolver um protótipo para testes e validar o funcionamento do controlador.

II. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da solução para os dois problemas citados utilizou-se o modelo de referência PRODIP. A

avaliação visou a facilidade de adaptação do sistema no local em questão, o nível de controle exigido e os custos

envolvidos. O fluxograma mostrado na Fig. 3 apresenta o passo a passo.

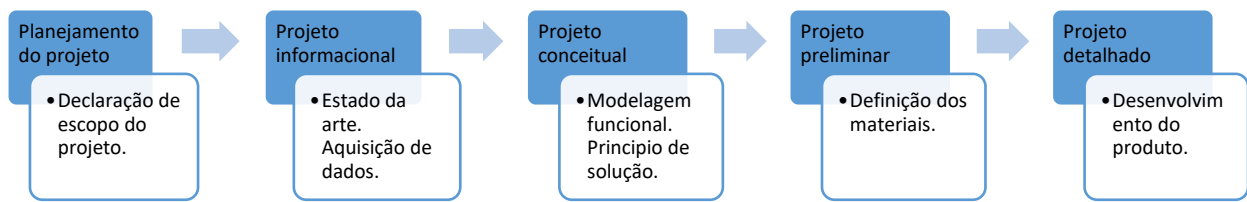


Fig. 3. Metodologia do desenvolvimento do projeto.

A. Planejamento do projeto.

A etapa inicial de planejamento consistiu na divisão do projeto em etapas específicas, com o intuito de organizar a busca pela solução ideal para o problema. Definiu-se que, no projeto informacional, fosse realizada uma pesquisa de campo, envolvendo a observação direta das atividades no local, pesquisa na literatura e análise de possíveis soluções já existentes. Com estes dados, passou-se para a definição do projeto conceitual, onde determinou-se quais soluções para o problema deveriam ser elaboradas e modeladas. Em seguida, propôs-se a elaboração do projeto preliminar do sistema, através da definição dos materiais a serem utilizados, com base no que foi definido na etapa anterior. Por fim, a etapa do projeto detalhado foi definida, envolvendo a determinação das posições de instalação dos componentes nas salas, diagrama elétrico, fluxograma dos componentes eletrônicos e manual de operação do controlador. Com tudo isso, o sistema de controle proposto foi implementado através de um protótipo, incluindo a execução do projeto e montagem dos componentes.

B. Projeto informacional.

Na etapa do projeto informacional, buscou-se identificar e satisfazer as necessidades do cliente. Para isso foram definidas as especificações de projeto baseadas nos requisitos operacionais das aplicações. Foi realizada uma pesquisa em campo que tratou do acompanhamento de um medidor de temperatura, *Data Logbox*, como mostrado na Fig. 4, na sala de máquinas. Esse medidor registrou a temperatura ao longo de uma semana de trabalho (cinco dias uteis), realizando medições periódicas a cada minuto. Assim, foi possível acompanhar a variação de temperatura e identificar o horário de pico em que a temperatura da sala se mostrava mais alta. Além disso, foi realizada uma pesquisa na literatura em busca de trabalhos semelhantes, com o objetivo de comparar os resultados obtidos e explorar possíveis soluções para o estudo.

Para a aquisição de dados, o medidor de temperatura utilizado possuía entrada para sensor (termopar tipo k), que foi posicionado próximo aos motores em funcionamento.



Fig. 4. Data Logbox.

C. Projeto conceitual.

Na fase do projeto conceitual, o foco foi a elaboração de soluções e modelagens funcionais. Baseado na análise realizada no projeto informacional, foi definida a melhor forma para desenvolver a estrutura do projeto. Foram considerados os requisitos técnicos necessários para atender aos objetivos propostos (conforme mostrados na Tabela I).

TABELA I. Especificações do sistema de controle.

Especificações do Projeto		
Requisito	Objetivos	Saídas indesejáveis
Controlar temperatura dos motores	Máx. 40°C	Superaquecimento dos motores
Controlar temperatura da estufa	70°C a 90 °C	Baixa temperatura para secagem
Ter comando à distância	Painel fora das salas	Dificuldade de controle das temperaturas
Interface de usuário simples	Programa intuitivo	Complexidade de programação
Quantidade de etapas no software	Máx. 4	Programação errada
Tempo para refrigeração da sala de máquinas	Máx. 10 min	Danos nos motores
Tempo para atingir temperatura de secagem	Máx. 10 min	Atraso na operação

Levando esses elementos em consideração, foram gerados diferentes conceitos e soluções possíveis, os quais foram avaliados com base em critérios como viabilidade técnica e custo. Foi empregada a matriz morfológica para auxiliar na busca, levantamento e geração dos princípios de solução destinados a atender as funções elementares do equipamento.

D. Projeto preliminar.

A etapa do projeto preliminar buscou a integração de todas as soluções obtidas. Utilizou-se software CAD (*SolidWorks*) para elaboração do projeto, com as informações dimensionais das salas e locais de instalação de cada componente.

E. Desenvolvimento do sistema.

Com todo o planejamento dos itens anteriores, o projeto foi executado, incluindo a instalação dos componentes e a confecção do sistema de controle em um protótipo.

Após a instalação do sistema, foram realizados testes para simular e medir a temperatura das salas. No teste do exaustor, foi simulado o aquecimento da sala de máquina com um soprador térmico e feito a verificação do acionamento do exaustor. Já para o teste do aquecedor, o sistema foi iniciado pela IHM, sendo selecionado a duração da secagem e acompanhada a variação de temperatura ao longo de 3 dias, gerando um gráfico onde é analisado o comportamento do sistema.

Com relação aos componentes e materiais selecionados e utilizados no projeto, podem ser divididos em componentes mecânicos e eletroeletrônicos, conforme a seguir:

- i) Mecânicos: exaustor industrial e aquecedor cerâmico;
- ii) Eletroeletrônicos: Atmega328p, termopar tipo K, módulo MAX6675, IHM e conversor RS232 para TTL.

III. RESULTADOS

A. Caracterização do problema.

Para determinação do problema real, a aferição da temperatura da sala de máquinas foi o primeiro procedimento realizado e os resultados estão demonstrados no gráfico da Fig. 5. O intervalo de medição compreendeu cinco dias seguidos. A linha em azul representa a temperatura medida por um termopar posicionado próximo aos motores.

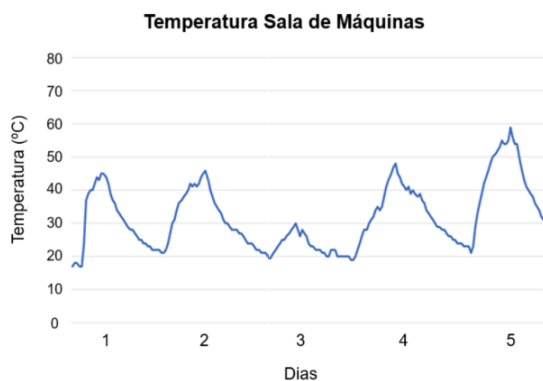


Fig. 5. Variação da temperatura da sala de máquinas.

Neste gráfico, é possível observar o comportamento da temperatura na sala, dia após dia, onde foi instalado o medidor. Inicialmente, no dia 1, a temperatura registrada foi subindo até atingir cerca de 45°C. Esse comportamento se repetiu no segundo dia. No terceiro dia o pico de temperatura atingido não foi crítico. Já nos dias 4 e 5 os picos de temperatura foram bem definidos e superiores ao limite recomendado para os motores (que é de 40°C). Observa-se

que a temperatura máxima foi próxima de 60°C (dia 5), o que é considerado crítico. Além desses cinco dias foi feita novas coletas de dados, porém os dados se mostraram parecidos com os dados já apresentado.

Na Fig. 6, está representado o layout das duas salas (de máquinas e estufa) conforme dispostas na empresa. Baseado nele e nas dimensões reais dos ambientes, foi definido o sistema de controle de temperatura simultâneo, para deixar a sala de máquinas mais adequada para o funcionamento dos motores e melhorar o rendimento energético da sala de estufa.

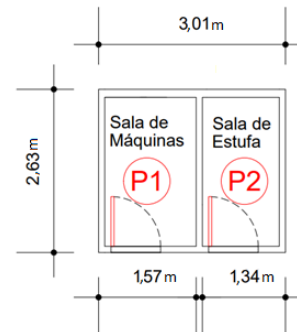


Fig. 6. Layout inicial dos ambientes.

Para determinação da temperatura final com o sistema operando, considerando a situação mais crítica, onde a troca de calor se dá por convecção natural, sem exaustão, utilizou-se a equação 4. Substituindo os valores do volume e temperatura das salas obteve-se o seguinte resultado:

$$T_{eq} = \frac{(1,57 * 2,63 * 2,43)60 + (1,34 * 2,63 * 2,43)30}{(1,57 * 2,63 * 2,43) + (1,34 * 2,63 * 2,43)}$$
$$T_{eq} = 46,18^{\circ}\text{C}$$

Sendo assim, a temperatura de equilíbrio nas duas salas fica em torno de 46 °C. Esse valor, de certa forma, é satisfatório, pois não foi considerado o exaustor no cálculo. Ao analisar o sistema com o exaustor, interpreta-se que a temperatura das duas salas não permitirá que a temperatura atinja o equilíbrio, resfriando a sala de máquinas e transferindo o calor para a outra sala.

Para o projeto do exaustor, tem-se em mente a vazão em m^3/h . Ao multiplicar o volume de ar do ambiente pelo número de trocas do ar por hora, temos a vazão do exaustor. Estipulando um número de troca de ar de no mínimo oito vezes, valor este baseado em padrão usado por fabricantes, tem-se:

$$Q = V * n_{trocas} \quad (4)$$

Substituindo os valores:

$$Q = 1,57 * 2,63 * 2,43 * 8$$

$$Q = 61,15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este resultado indica que, no intervalo de uma hora, é necessário um deslocamento de, no mínimo, 61,15 m^3 de massa de ar quente para o resfriamento da sala. Um exaustor

industrial comum, de 30 cm de diâmetro, por exemplo, possui uma vazão de $1500\text{m}^3/\text{h}$, ou seja, a seleção do exaustor apresenta boa margem de segurança.

B. Solução proposta.

A busca pela solução se baseou nas duas necessidades da empresa: refrigerar a sala de máquinas e aquecer a sala de estufa. Assim, o sistema deve transferir a massa de ar quente de uma sala para outra (nos horários em que a temperatura da sala de máquinas está alta) e, também, garantir o aquecimento da sala de estufa nos horários em que não há calor suficiente.

Na tabela II está apresentada a matriz morfológica com as necessidades estipuladas e as possíveis soluções para cada componente do projeto. Os itens em destaque representam as soluções escolhidas, definidas com base em custo-benefício e facilidade de implementação.

TABELA II. Matriz Morfológica.

Função	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Refrigeração da sala de máquinas	Aparelho de ar-condicionado	Ventilação natural (janelas)	Ventilação forçada (exaustor)
Aquecimento da estufa	Aquecedor a gás	Transferência de calor da sala de máquinas	Transferência de calor + aquecedor cerâmico
Circulação de calor	Saída para ambiente externo (ar-condicionado)	Cano na boca do exaustor até a outra sala	Furo passante na parede entre as salas (exaustor industrial)
Forma de controle	Controlador industrial dedicado	Desenvolvimento de um controlador próprio	
Controlador da estufa	ON/ OFF	PID	PI
Controlador da sala de máquinas	ON/ OFF	PID	PI
Aferição de temperatura	Termômetro comercial	Termopar tipo K	Termopar tipo J
Interação com o usuário	IHM <i>touch screen</i>	Placa convencional com display e botões	

A proposta selecionada para o sistema de reaproveitamento de calor conta com um trocador de calor, que transfere o calor da sala de máquinas para a sala de estufa. Além disso, ambas as salas possuem sensores de temperatura divididos, o que permite identificar a temperatura de cada uma. Essas informações são lidas por um controlador, que monitora a temperatura da sala de máquinas e aciona o exaustor quando ela está muito alta, transferindo assim o calor de uma sala para a outra. Adicionalmente, caso a temperatura da sala de máquinas esteja baixa e seja necessária a secagem, o controlador ativará um aquecedor instalado na sala da estufa.

À medida que a temperatura da sala de máquinas atinge $40\text{ }^\circ\text{C}$, o sistema acionará um exaustor, que direciona o ar quente para a sala de estufa, otimizando a secagem dos equipamentos. Esse controle será feito passivamente, sem interação com o usuário. Caso o usuário precise fazer a secagem de algum equipamento e a sala de máquinas não esteja produzindo calor suficiente para ligar o exaustor, a sala de estufa terá um aquecedor, responsável por aumentar a temperatura da sala de estufa até que a temperatura da sala de máquinas seja suficiente para ligar o exaustor. Além disso o

controlador contém nove temporizadores programáveis, para o controle de quanto tempo cada equipamento fica dentro da estufa.

C. Estrutura e Layout.

A partir do projeto conceitual, foram definidos os componentes e materiais utilizados no projeto. Eles podem ser divididos em componentes mecânicos e eletroeletrônicos, conforme a seguir:

i) Mecânicos:

A Fig. 7 mostra o modelo de exaustor selecionado. Trata-se de um exaustor industrial de 30 cm de diâmetro e vazão de $1500\text{ m}^3/\text{h}$, responsável por transferir calor para a sala da estufa, resfriando, consequentemente, a sala de máquinas. Necessitará de uma fonte de alimentação de 220V e seu acionamento será realizado por um contactor.

Além do exaustor, selecionou-se um aquecedor cerâmico com 3000kW de potência e tensão de alimentação de 220V. Estas características foram definidas com base nas informações do fabricante com relação à capacidade de aquecimento de ambientes fechados. Este equipamento necessita, para seu acionamento, de um relé de estado sólido de corrente 10A. O modelo do exaustor pode ser observado na Fig. 8.



Fig. 7. Exaustor de parede.



Fig. 8. Aquecedor cerâmico.

ii) Eletroeletrônicos:

Foram definidos alguns componentes para a placa, como duas entradas para os sensores de temperatura, uma saída PWM para controlar o aquecedor e outra saída para acionar o exaustor. Além disso, percebeu-se necessária uma interface para interação com o usuário, sendo escolhida uma IHM (Interface Homem-Máquina) Dwin/dmg48270c043_15wtr. Para a comunicação entre o microcontrolador e a IHM, utilizou-se um módulo RS232 para TTL.

O Atmega328p é o componente central, responsável pelo controle de diversos periféricos em sistemas embarcados. Ele é essencial para a leitura dos sinais dos sensores, processando as informações recebidas e tomando decisões com base nesses dados. Além disso, o microcontrolador gerencia a ativação de saídas. Este microcontrolador, possui uma tensão de operação de 5V, 23 entradas e saídas digitais, 32KB de memória Flash, 2KB de memória SRAM e 1KB de memória EEPROM [16].

O sensor de temperatura utilizado foi do tipo K. Esse sensor é muito encontrado no mercado e, no geral, são usados para mensurar faixa de temperatura entre $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $+600\text{ }^\circ\text{C}$.

Para realizar a leitura do sensor de temperatura utilizou-se o módulo MAX6675, que tem a função de ler a tensão que

passa pelo termopar e enviar, via SPI, o valor medido já com o sinal tratado para o microcontrolador.

O conversor RS232 para TTL é um módulo que converte sinais RS232 em sinais de nível TTL, facilitando a comunicação entre computadores e microcontroladores. Ele utiliza o circuito integrado MAX3232 para realizar a conversão de forma confiável e segura. O módulo possui uma porta RS232 DB9 fêmea para conexão e, na outra extremidade, quatro pinos (GND, RXD, TXD, VCC) para ligação direta ao microcontrolador.

Como forma de interação com o usuário, uma tela foi projetada para fornecer uma interface intuitiva ao usuário, permitindo a visualização de informações essenciais do sistema. Entre os dados exibidos, estão a temperatura atual das duas salas, a seleção do *setpoint* (valor desejado de controle para a sala de estufa) e nove contadores, que têm como objetivo monitorar o tempo em que cada equipamento permanece na estufa. A IHM possui toque resistivo de 4,3 polegadas, resolução de 480x272 pixels e 8MB de memória da DWIM. Ela funciona com comunicação UART, Rs232, Rs484 e TTL (*Transistor-Transistor Logic*).

O projeto em software CAD das salas e o posicionamento dos componentes do sistema de troca de calor, está mostrado na Fig. 9. O exaustor foi posicionado na parede entre as duas salas (a cerca de 1,90 m de altura), o aquecedor foi posicionado no chão da sala de estufa e o controlador deverá ser instalado na parede (externa) entre as duas salas.

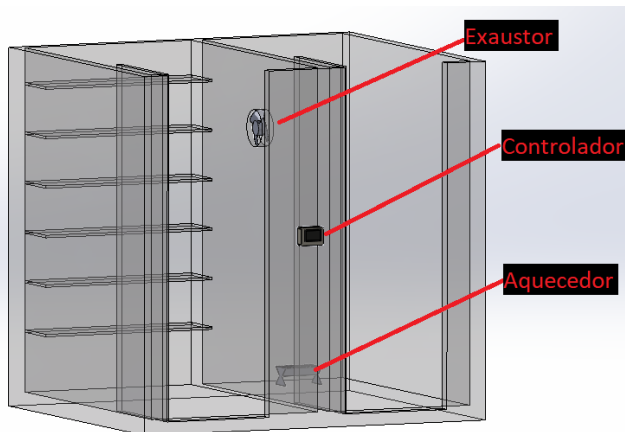


Fig. 9. Layout da sala desenvolvida.

D. Desenvolvimento do sistema.

Com a definição dos componentes de hardware, foi iniciado o desenvolvimento do software, utilizando a plataforma Arduino IDE. Foram utilizadas apenas as bibliotecas padrões para programar o controlador, enquanto a IHM foi desenvolvida usando o software DGUS da Dwin.

No desenvolvimento do software, foram contempladas tanto a programação do controlador quanto a configuração da Interface Homem-Máquina (IHM). O controlador foi programado em C++, enquanto a IHM foi configurada utilizando o software fornecido pelo fabricante (Dgus), conforme ilustrado na Fig. 10. Para a programação da IHM, foi necessário configurar as imagens das telas em um programa específico, com o objetivo de ajustar o tamanho da imagem para 480x270 pixels. O software utilizado para essa

tarefa foi o editor de imagens do Windows. Após esse processo, as imagens foram incorporadas à interface, possibilitando a organização dos botões e das caixas de texto diretamente no software da IHM.

O software do controlador foi estruturado em três funções principais: "envia dados", "recebe dados" e "controle". A função "envia dados" realiza a leitura de dois sensores e transmite os valores obtidos para a IHM por meio da comunicação RS232. A função "recebe dados" é responsável por captar as informações enviadas pela IHM, como, por exemplo, a ativação de um botão. Já a função "controle" gerencia as saídas do controlador com base nos valores de temperatura recebidos.



Fig. 10. Interface gráfica para configuração de temporizadores no sistema HMI DWIN.

Após a finalização do software, iniciou-se o desenvolvimento da placa de circuito impresso, a qual integra o microcontrolador ATmega328p, o transistor (BC847) para a saída PWM (acionamento do aquecedor), uma saída para o relé de 12V destinado ao exaustor, duas entradas para os sensores de temperatura, além de um IHM para interação com o usuário. Para a realização do projeto, utilizou-se o software KiCAD, que possibilitou o desenho do circuito da placa, que pode ser observado na Fig. 11.

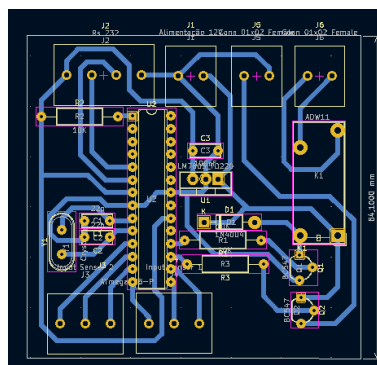


Fig. 11. Layout da placa desenvolvida.

Antes de realizar a impressão da placa, o software e o hardware foram testados utilizando um Arduino Uno. Após a conclusão dos testes, iniciou-se a produção da placa no IFSC (Instituto Federal de Santa Catarina), utilizando uma impressora para realizar a impressão do circuito e, posteriormente, efetuando a transferência térmica do papel para a placa de fenolite, seguida de seu processo de corrosão. Em seguida, os componentes foram soldados e realizados

testes para verificar a comunicação entre a IHM e o microcontrolador, a leitura dos sensores e o acionamento das saídas. A parte interna do controlador montado pode ser observada na Fig. 12.

A Fig. 13. mostra o esquema de toda a estrutura do sistema, onde a placa de circuito impresso desenvolvida faz o controle do sistema de reaproveitamento de calor. Foram, ainda, utilizados alguns condicionadores de sinais para a parte de potência, como o contator e o relé de estado sólido. Estes são necessários para que a placa desenvolvida consiga acionar as saídas, pois o aquecedor e o exaustor funcionam com 220V.



Fig. 12. Placa e componentes montados.

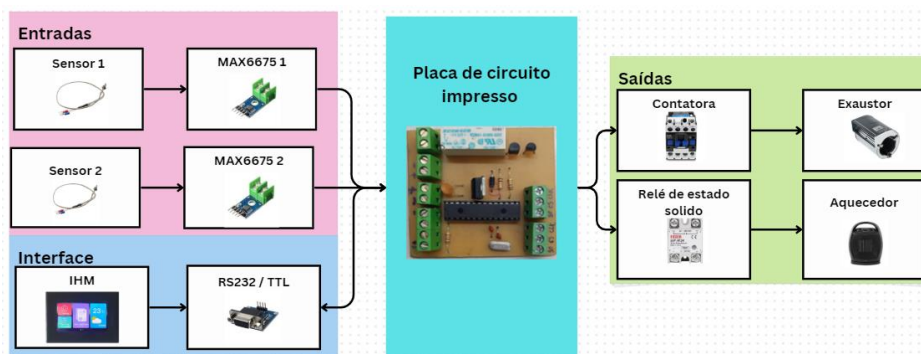


Fig. 13. Diagrama da estrutura do sistema.

Na Fig. 14, está apresentado um fluxograma do funcionamento do controlador. Os quadros em vermelho representam o funcionamento referente a sala de máquina e os quadros em amarelo são referentes ao funcionamento da estufa. O sistema parte do “Estado Inicial”, e quando a temperatura da sala de máquina atingir 40 °C o controlador liga o exaustor, que só será desligado quando a temperatura da sala se manter inferior a 40 °C por três minutos. Este tempo foi configurado para que o contactor não seja danificado por ligamentos intermitentes. Voltando para o “Estado Inicial”, se qualquer temporizador for iniciado e a temperatura de *setpoint* da estufa for selecionada, o controlador vai iniciar o controle PI.

O sistema foi dividido em quatro partes: entrada, interface, placa de circuito impresso e saída. Na parte de entrada, há dois sensores termopar tipo K, cada um conectado a um módulo MAX6675, que recebe o sinal de temperatura do sensor e, por meio de comunicação SPI, envia os dados para a placa de circuito impresso. Na interface, está a IHM da Dwin, onde é feita a interação com o usuário. Para a comunicação com a placa de circuito impresso, foi utilizado um conversor de RS232 para TTL, uma vez que a IHM utiliza comunicação TTL e a placa de circuito impresso utiliza RS232.

A placa desenvolvida possui um microcontrolador Atmega328P, regulador de tensão de 5V (L7805CV), uma saída digital com relé, uma saída analógica com transistor, duas portas de comunicação SPI para os módulos MAX6675 e uma porta de comunicação RS232 com a IHM. Por fim, as saídas do sistema incluem um exaustor e um aquecedor, que são acionados por um contactor e um relé de estado sólido, respectivamente. Essas saídas são controladas pela placa, sendo o exaustor ligado à saída com relé e o aquecedor à saída com transistor.

A interação do usuário para utilização deste controle está mostrada (tela por tela) na fig. 15. Ao ligar o equipamento, a tela inicial (tela 1) é exibida. Nessa tela, há dois botões: 'Início' e 'Programa'. Ao pressionar o botão 'Início', a interface exibe a tela de visualização (tela 2), onde é possível acompanhar a temperatura das duas salas e verificar o status dos temporizadores (habilitados ou desabilitados).

Além disso, essa tela contém dois botões: 'Home', que retorna à tela inicial, e 'Ampliar', que avança para a tela 3 onde exibe os temporizadores em mais detalhes, incluindo os minutos. Voltando à tela inicial (tela 1), ao pressionar o botão 'Programa' tem acesso a tela 4, o usuário pode configurar os temporizadores (tela 5) e ajustar a temperatura dentro da estufa (tela 6).

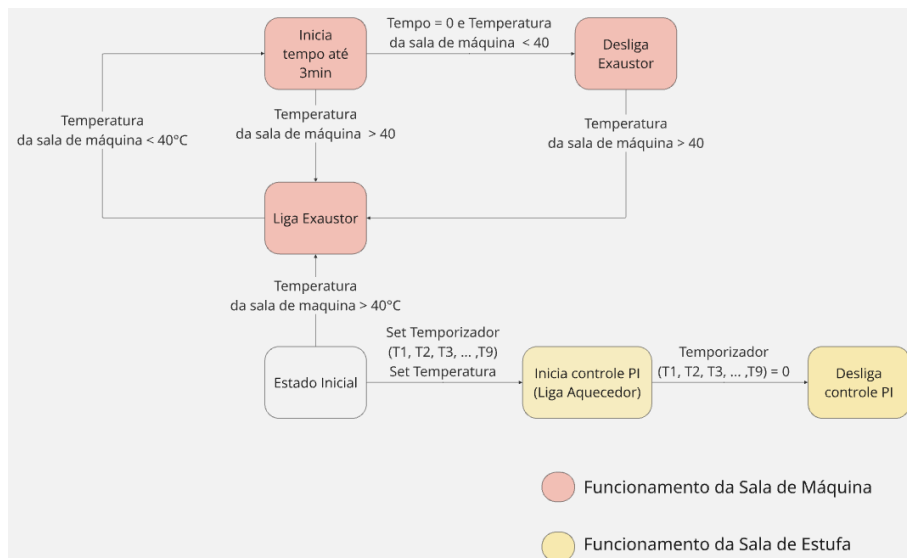


Fig. 14. Esquema de funcionamento do controlador.

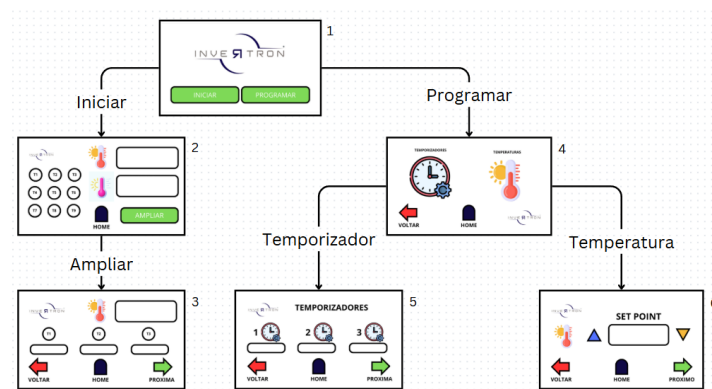


Fig. 15. Diagrama das telas.

E. Validação.

Para realizar testes de validação do sistema, foi desenvolvido um protótipo, no qual o controlador foi instalado para fins de simulação. Para esta adaptação, uma caixa térmica foi modificada para simular a estufa. Dentro dela, foi instalado o aquecedor, externamente, o exaustor (parte de trás) e o controlador desenvolvido para realizar o controle do aquecedor e exaustor. Para registrar a temperatura, foi utilizado o mesmo sensor de temperatura empregado na aquisição dos dados. A Fig. 16 mostra o protótipo desenvolvido.

Na execução do teste do protótipo, utilizou-se como *setpoint* para o aquecedor a temperatura de 80°C e para o exaustor a temperatura de 40°C. Para simular o aquecimento dos motores foi utilizado um soprador térmico direcionado ao sensor de temperatura, permitindo a observação do acionamento do exaustor sempre que a temperatura atingia 40°C. Os resultados das medições de temperatura interna do protótipo em funcionamento estão apresentados na Fig. 17.



Fig. 16. Protótipo desenvolvido.

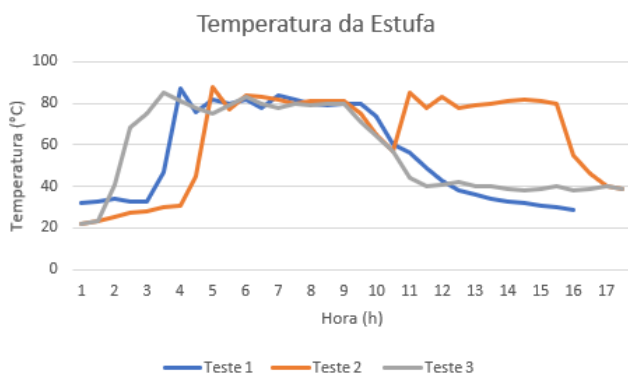


Fig. 17. Gráfico da temperatura de teste da estufa.

O gráfico apresenta a variação de temperatura de três ensaios conduzidos em dias distintos. Verifica-se que, ao longo dos testes, a variável controlada permaneceu próxima do *setpoint* de 80 °C com ocorrência de pequenas oscilações em cada curva. Este comportamento está dentro do previsto em função da inércia durante troca de calor no ambiente. Ressalta-se que a otimização do desempenho do controlador pode ser obtida por meio de ajustes finos nos parâmetros de ganho, de modo a reduzir as variações em torno do ponto de operação.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, restando a implantação dentro da empresa. Foram realizados estudos que comprovaram o potencial do reaproveitamento de energia térmica como uma alternativa sustentável. Também se estabeleceu de forma clara a configuração física necessária para viabilizar o deslocamento do ar entre os ambientes. A construção da parte eletrônica do sistema foi concluída com êxito, assim como o desenvolvimento do software responsável pela lógica de controle e interface com o usuário. Com isso, foi possível montar um protótipo funcional que permitiu validar os principais aspectos da proposta. Embora não foi possível implementar o projeto na empresa como planejado, os testes realizados com o protótipo da estufa, foram satisfatórios, permitindo controlar a temperatura de dentro da estufa com o controle PI e realizar a temporização de nove equipamentos simultaneamente dentro da estufa.

PROJETOS FUTUROS

Como recomendações para futuros trabalhos, sugere-se a implementação de um banco de dados para realizar o armazenamento e registro de informações, como das duas temperaturas, ou o tempo em que o aquecedor e o exaustor ficam ligados por dia. Isso permitirá a realização do cálculo do gasto energético do equipamento.

Além disso, recomenda-se a instalação de um sensor de umidade para melhorar o controle da secagem de cada equipamento dentro da estufa. Com isso, será possível verificar se o equipamento está realmente seco. Caso contrário, o controlador poderá adicionar automaticamente mais tempo de operação até que os níveis de umidade estejam dentro de valores aceitáveis. Por fim, sugere-se a implementação prática do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, E. S. de; BACCI, S. C. C.; PARIS, L. R. P.; MENEGASSI, W. J. C.; ANTUNES NETO, J. M. F. *Automação nos processos industriais: processo de implementação e o papel do gestor de tecnologia da informação*. Revista Prospectus, Itapira, v. 6, n. 1, 2024. 51 p. Disponível em: <https://share.google/f5g5mGHp23WW6wt4a>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- [2] COSTA, M. H. F. *Análise comparativa da utilização de dois equipamentos para partida direta de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilho: inversores de frequência x chaves de partida estática (soft-starter)*. 2014. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2014.
- [3] FITZGERALD, A. E. *Máquinas elétricas*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [4] WEG. *CFW09 – Inversores de frequência*. Jaraguá do Sul: WEG, 2012.
- [5] WEG. *SSW06 – Soft-Starter*. Jaraguá do Sul: WEG, 2016.
- [6] WEG. *Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM*. Jaraguá do Sul: WEG, [s.d.]. 16 p. Disponível em: <https://static.weg.net/...> Acesso em: 19 abr. 2025.
- [7] MOREIRA, J. R. S.; AGUILAR, E. W. Z. *Fundamentos de transferência de calor para engenharia*. Grupo GEN, 2022. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- [8] CIADOSEXAUSTORES. *O que são exaustores?* 2022. Disponível em: <https://www.ciadosexastores.com.br/...> Acesso em: 29 abr. 2025.
- [9] COSTA, L. *Dimensionamento e seleção de exaustores eólicos junto ao projeto de isolamento térmico de um recinto*. UFOP, 2022. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/...> Acesso em: 5 jun. 2025.
- [10] MARTINS, F. M. P. *Um estudo comparativo entre redes neurais artificiais e regressão linear na previsão de preços de imóveis em Fortaleza*. 2020. 69 f. TCC – UFC, Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/...> Acesso em: 19 abr. 2025.
- [11] OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [12] FERRARI, T. C.; SENA JR., E. F.; MENDES, C. L.; et al. *Instrumentação e controle de processos*. Grupo A, 2022. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/>. Acesso em: 16 maio 2025
- [13] BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. *Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modulação*. Barueri: Manole, 2008.
- [14] RODRIGUES, C.; POSTAL, L.; DA G. *Desenvolvimento do projeto conceitual de um sistema para plantaçao hidropônica*. ENEGEP, São Paulo, out. 2019. Disponível em: <https://www.abepro.org.br/...> Acesso em: 5 jun. 2025.
- [15] WEG. *FAQ – WEG*. Disponível em: <https://www.weg.net/...> Acesso em: 18 abr. 2025.
- [16] ATMEL CORPORATION. *ATmega328 – Datasheet*. 2002. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/...> Acesso em: 31 abr. 2025.