



Universidade Federal
de São João del-Rei

Trabalho Final de Curso

Controle Térmico com Pastilhas Peltier Usando SCADABR e
Arduino Uno via Modbus Serial

Aluno: Luan Bruno Araújo Terra

Orientador: Samir Angelo Milani Martins

São João del-Rei, 1 de dezembro de 2024

Resumo

O presente trabalho desenvolveu uma interface gráfica integrada para controlar e monitorar um sistema térmico, utilizando Arduino UNO como controlador e o supervisório SCADA BR para aquisição e gerenciamento de dados. A planta do projeto é composta por um recipiente acrílico com água, com controle térmico por pastilhas Peltier, ventiladores e bomba de água. Inspirado no Projeto Caracol, realizado na ETEC em 2020, este trabalho apresenta tecnologias industriais aplicáveis em atividades didáticas, demonstrando a repetibilidade do controle térmico e abrindo possibilidades para previsões precisas de temperatura.

A planta utilizada neste projeto consiste em um recipiente acrílico com água que se deseja controlar a temperatura, para isto, o projeto conta com algumas camadas, sendo resumidamente três delas. A primeira pode ser comparada a um CLP (Controlador Lógico Programável) na indústria, é o Arduino UNO, ele é responsável pela coleta de dados, acionamento de relés e também permite a escolha de temperatura via potenciômetro. A segunda camada é o circuito de potência da planta, que conta com uma bomba de água, ventilação e pastilhas Peltier, que de acordo com a tensão aplicada, geram uma diferença de temperatura entre suas faces. Por fim, a última camada é o supervisório, desenvolvido na plataforma SCADA BR, responsável pela organização dos dados e tomadas de decisão. Ele irá comunicar com o Arduino via Modbus Serial.

O trabalho pretende contribuir para o aprendizado de conceitos básicos utilizados no dia a dia da indústria, trazendo para atividades mais simples tecnologias eficientes para controle de processos. Como resultado do controle térmico, pôde se observar repetibilidade no seu comportamento, o que abre a possibilidade de se efetuar um controle mais preciso e executar previsões de tempo para atingir a temperatura desejada.

Palavras Chave: Arduino, Modbus Serial, SCADA BR, controle, Peltier.

Sumário

1	Introdução	2
2	Conceitos Preliminares	4
2.1	Sistemas SCADA.....	4
2.2	SCADA BR.....	4
2.3	Watch List	5
2.4	Data Points	5
2.5	Data Source	7
2.6	Data Source Meta	7
2.7	Protocolos de Comunicação.....	8
2.8	1-Wire.....	10
2.9	Sensores de Temperatura DS18B20.....	10
2.10	Modbus Serial	11
2.11	Arduino.....	12
2.12	Pastilha Peltier	12
3	Metodologia.....	13
3.1	Sistema Térmico	13
3.2	Sensores e Atuadores.....	15
3.3	Aquisição de dados em tempo real	16
3.4	Sistema Supervisório e Lógica de Operação.....	16
3.5	Interface Gráfica	18
4	Resultados.....	18
5	Conclusão	24
6	Trabalhos Futuros	25
7	Referências	25
8	Anexo	26
8.1	Anexo A: Esquemas Elétrico	26
8.2	Anexo B: Material e Orçamento	27

1 Introdução

A necessidade de controlar processos e eventos a fim de atingir um melhor resultado com menores esforços, acompanha o ser humano desde os seus primórdios. Com o domínio de elementos da natureza como madeira e minérios, nossa espécie traçou o caminho que permitiu o controle de ambientes artificiais complexos. Ao longo da história da humanidade, ocorreram diversas mudanças no modo de vida, exigindo um controle mais eficiente dos recursos disponíveis para conseguir sustentar o conforto e praticidade dos dias atuais.

Automação industrial é a base para a eficiência e repetibilidade de processos em larga escala, influenciando diretamente a competitividade das indústrias. O controle térmico, como o proposto neste trabalho, é um exemplo prático e acessível para compreender conceitos fundamentais de sensores, atuadores e sistemas supervisórios. Este trabalho explora a integração entre Arduino UNO e SCADA BR, aplicando conceitos teóricos em uma solução prática, acessível e didática.

O consumo humano, seja para sobrevivência ou conforto, é permitido devido a alta capacidade produtiva das indústrias. Para essa capacidade e qualidade, a indústria também passou, e ainda passa, por revoluções, tendo como protagonista do seu sucesso, a Automação Industrial. Automatizar um processo, nesse contexto, significa dar autonomia a uma máquina, implementando sensores e atuadores em uma unidade de processamento, que serão controlados por uma rotina e que podem ter seus dados usados para eventuais aprimoramentos ou controle de produção.

Para que este controle de informação fosse eficaz, foram desenvolvidos protocolos de comunicação para cada tipo de aplicação e informação de interesse. Definir protocolos é fundamental para que dispositivos de diferentes fabricantes possam se comunicar, cabendo ao projetista analisar as características de cada protocolo e estabelecer qual rede será utilizada em cada camada. As camadas de comunicação industrial separam os dispositivos por sua função e formato de informação, tendo por exemplo, um protocolo utilizado na comunicação entre unidades de processamento local diferente do utilizado em sensores ou computadores.

Com o aumento das informações organizados em diferentes protocolos e camadas, os sistemas de controle e aquisição de dados, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), desempenham o papel de gerenciar e monitorar estas informações de forma eficiente. Nestas plataformas podem ser gerenciadas informações provenientes de diferentes fontes e formatos, sendo possível

monitorar grandes conjuntos de sensores, controlar os atuadores nos momentos adequados e também enviar informações, como e-mails de alerta ou relatórios para softwares de gestão.

Todo este poder e praticidade, atualmente estão disponíveis para entusiastas, hobbistas, estudantes e professores de forma acessível graças a criação de projetos OpenSource, como o SCADA BR e o Arduino, que neste trabalho são utilizados para a demonstração de controle e monitoramento de um sistema térmico. O controle de temperatura é uma ótima introdução ao estudo e à prática da automação, sendo um processo claro que permite ao projetista verificar seu resultado por meio de dados coletados e do próprio tato, o que para iniciantes pode ajudar na conferência do código de forma simples e rápida.

O projeto foi desenvolvido integralmente, abrangendo desde a parte física até a interface gráfica, que possibilita a escolha da temperatura alvo, a visualização da planta em tempo real, o acesso a dados históricos e o monitoramento do status dos atuadores. O conjunto é composto por um Arduino Uno como unidade de processamento, ele é responsável pela aquisição de dados e acionamento de atuadores, comunicando com o SCADA BR pelo protocolo de comunicação ModBus Serial. Se trata de um trabalho didático, com a finalidade de inspirar novos projetistas a praticarem automação até mesmo em casa, controlando iluminação, temperatura ou qualquer variável de interesse.

Ainda com o intuito de tornar este trabalho acessível, foi escolhido como atuadores térmicos as pastilhas Peltier, utilizadas em bebedouros e outros equipamentos térmicos. Esta pastilha possui baixo custo e complexidade de instalação quando comparado a outros, seu acoplamento é feito apenas posicionando suas faces no dissipador e no tanque de interesse com pasta térmica, sem a necessidade da utilização de gases.

Com esta configuração apresentada, é possível controlar a temperatura de até 1 litro de água na faixa de 15 a 80°C, exibindo informações de forma gráfica e intuitiva. O trabalho possui abertura para diversas melhorias, uma delas por exemplo, definir a função de transferência que represente o comportamento durante o aquecimento ou refrigeração, o que permitiria gerar uma previsão de quanto tempo levaria para atingir a temperatura escolhida.

Nos próximos capítulos, são detalhados os conceitos preliminares, a metodologia do projeto e os resultados obtidos, seguidos de sugestões para melhoria e as referências utilizadas.

2 Conceitos Preliminares

Os fundamentos explicados nesta seção são essenciais para a compreensão dos assuntos trabalhados neste projeto. Vale ressaltar que as tecnologias utilizadas possuem ramificações e propriedades que não serão abordadas, este trabalho apresenta apenas as ferramentas necessárias para a replicação e entendimento do projeto.

2.1 Sistemas SCADA

SCADA são softwares capazes de interligar e processar dados de múltiplas fontes e formatos, geralmente aplicados em processos industriais. Seu formato versátil permite que CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), IHMs (Interfaces Homem Máquina) e outros dispositivos possam ser acessados de diferentes pontos simultaneamente, podendo elaborar relatórios de produção ou emitir alarmes.

Estes softwares possuem diferentes interfaces e configurações dependendo da desenvolvedora responsável, podem ser citados como recursos em comum a organização dos seus dados em *Data Sources e Data Points*, exibindo e controlando-os por meio de uma *Watch List* ou Interface Gráfica, que por sua vez possuem rotinas elaboradas por meio de *Point Links* ou Receitas. Como configurar cada um destes itens depende da plataforma escolhida, podendo até ser usados diferentes termos com a mesma finalidade, no caso do trabalho elaborado foi utilizado o SCADA BR.

2.2 SCADA BR

O software SCADA BR, escolhido como supervisor neste projeto, demonstrou ser essencial na coleta e organização de dados. Por ser gratuito, em português e de fácil configuração, o SCADA BR tornou-se uma plataforma ideal para integrar o Arduino e gerenciar a comunicação via Modbus Serial. Sua versatilidade permitiu o controle eficiente do sistema térmico apresentado. Esta ferramenta é uma iniciativa da empresa MCA Sistemas (atual Sensorweb) em conjunto com a fundação CERTI e a UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), além das empresas convidadas Unis Sistemas e a Conetec, sendo todas instituições brasileiras. O projeto teve início em 2006 e hoje é um programa SCADA completo, possuindo hoje uma forte comunidade composta por empresas, hobbystas, alunos e inventores.

A versão utilizada neste trabalho é a 1.2, a interface é limpa e clara, ideal para se iniciar os

estudos deste tipo de tecnologia. Para melhor aproveitamento da tecnologia, é recomendado conhecimento prévio em programação, com destaque especial para a linguagem JavaScript, usada para elaborar rotinas, alarmes e interfaces gráficas.

Para compreender a estrutura e o funcionamento do SCADA BR, é importante explorar os principais componentes que suportam a organização e manipulação de dados no sistema. Esses elementos incluem a *Watch List*, que permite a visualização e controle das variáveis, os *Data Points*, que representam as informações monitoradas, e os *Data Sources*, que estabelecem a comunicação com os dispositivos externos. Além disso, o *Data Source Meta* desempenha um papel fundamental ao possibilitar o uso de scripts para processamento avançado de dados, aumentando a flexibilidade e funcionalidade do supervisor. A seguir, cada um desses itens será detalhado para demonstrar como foram configurados e utilizados neste projeto.

2.3 Watch List

A *Watch List* é a interface inicial do SCADA BR que exibe as variáveis (*Data Points*) configuradas, permitindo ao usuário monitorá-las e, em alguns casos, editá-las em tempo real. Ela foi utilizada neste projeto para organizar de forma clara os valores medidos pelos sensores e os status dos atuadores. Além disso, a personalização de visualizações, como hierarquias e cores, facilitou a análise do desempenho do sistema térmico. Essa abordagem permitiu que o controle fosse ajustado rapidamente, mesmo em situações experimentais.



Sistema de Monitoramento - Resfriar	-----	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			
Sistema de Monitoramento - Ar	OFF	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			
Sistema de Monitoramento - Bomba	OFF	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			
Sistema de Monitoramento - Chave	ON	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			
Sistema de Monitoramento - Histerese	1.0	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			
Sistema de Monitoramento - T - Dissipador	24.0°C	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			
Sistema de Monitoramento - T - Tanque	24.3°C	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			
Sistema de Monitoramento - T - Água	21.0°C	13:46:19	<input checked="" type="checkbox"/>			

Figura 1: Watch List.

2.4 Data Points

Os Data Points são as variáveis individuais monitoradas ou controladas pelo SCADA BR. Cada ponto corresponde a um dado específico, como temperaturas medidas, status de relés ou

comandos enviados. No projeto, os sensores DS18B20 foram configurados como Data Points para monitorar as temperaturas em diferentes partes do sistema. Os atuadores, como a bomba d'água e as pastilhas Peltier, foram configurados como variáveis booleanas que representavam estados de acionamento. Essa estrutura clara garantiu a integração eficiente entre o Arduino e o SCADA BR.

Como a plataforma engloba diversos tipos de protocolos de comunicação, ao adicionar uma variável é necessário respeitar a arquitetura escolhida, abaixo segue um exemplo de adição de Data Points para Data Sources do tipo Meta e ModbusSerial:

The screenshot shows the 'Data points' table with the following data:

Nome	Tipo de dado	Status
Alvo	Númerico	
Aquecer	Binário	
Ar	Binário	
Bomba	Binário	
Histerese	Númerico	
Resfriar	Binário	
T - Agua	Númerico	
T - Dissipador	Númerico	
T - Tanque	Númerico	
teste	Binário	

The 'Detalhes do data point' window is configured for a Meta data source with the following settings:

- Nome: (empty)
- Export ID (XID): DP_198306
- Tipo de dado: Binário
- Configurável: ☐
- Contexto do script: Sistema de Controle - Alvo
- Script: (empty)
- Atualizar evento: Atualizar contexto
- Atraso de execução (segundos): 0

Figura 2: Data Point Meta.

The screenshot shows the 'Data points' table with the following data:

Nome	Tipo de dado	Status	Escravo	Faixa	Offset (baseado em 0)
Alvo	Númerico		1	Registrador holding	0
Aquecer	Binário		1	Bobina (Coil Status)	0
Ar	Binário		1	Bobina (Coil Status)	3
Bomba	Binário		1	Bobina (Coil Status)	2
Chave	Binário		1	Entrada Discreta (Input Status)	0
Histerese	Númerico		1	Registrador holding	1
Resfriar	Binário		1	Bobina (Coil Status)	1
T - Dissipador	Númerico		1	Registrador de entrada (Input Register)	0
T - Tanque	Númerico		1	Registrador de entrada (Input Register)	1
T - Agua	Númerico		1	Registrador de entrada (Input Register)	2

The 'Detalhes do data point' window is configured for a ModbusSerial data source with the following settings:

- Nome: (empty)
- Export ID (XID): DP_064201
- Id do escravo: 1
- Faixa do registro: Bobina (Coil Status)
- Tipo de dados modbus: Binário
- Offset (baseado em 0): 0
- Bit: 0
- Número de registradores: 0
- Codificação de caracteres: ASCII
- Configurável: ☒
- Multiplicador: 1
- Aditivo: 0

Figura 3: Data Point ModbusSerial.

A plataforma dispõe para o usuário a opção de selecionar um período específico para análise, fornecendo dados estatísticos sobre o ponto e uma exibição gráfica. O valor de cada ponto pode ser representado de forma personalizada, como por exemplo, as saídas booleanas podem ser represen-

tadas por textos coloridos, assim como a imagem 4:

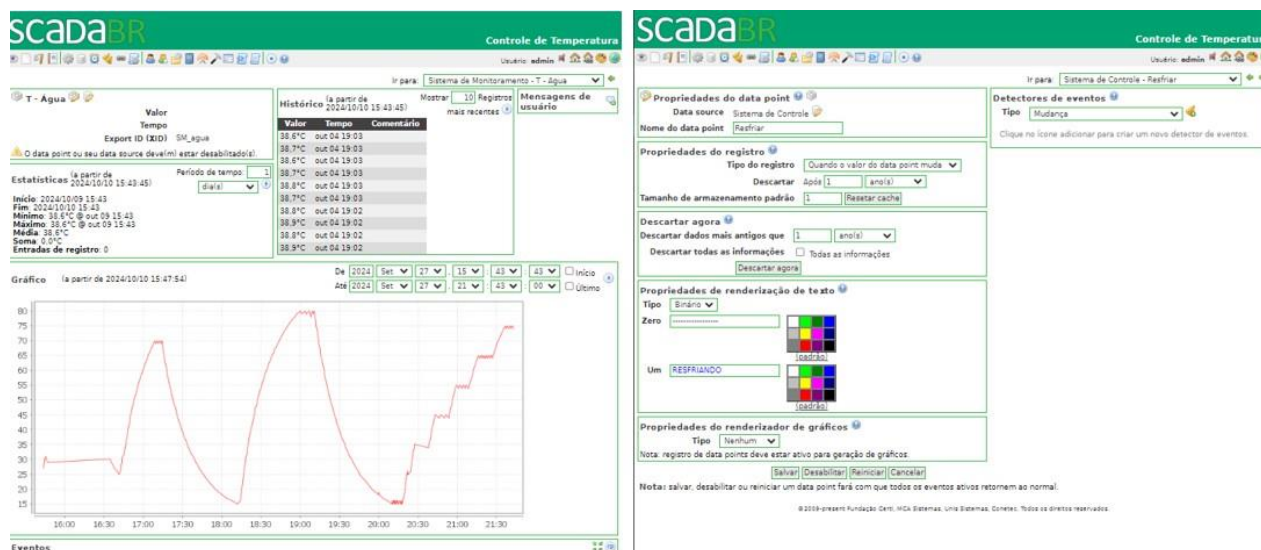


Figura 4: Configuração do Data Point.

2.5 Data Source

O Data Source estabelece a comunicação entre o SCADA BR e os dispositivos externos. No caso deste projeto, o Data Source configurado foi do tipo Modbus Serial, conectando o Arduino Uno ao supervisão. Essa configuração envolveu a definição do protocolo, identificador do escravo, taxa de atualização e outras características específicas. Essa escolha foi crucial para garantir a confiabilidade da transmissão de dados, permitindo ao SCADA BR interpretar os sinais enviados pelo Arduino e controlar os dispositivos térmicos de forma precisa.

2.6 Data Source Meta

O Data Source Meta permite manipular os dados dos Data Points utilizando scripts programados em JavaScript. No projeto, essa ferramenta foi usada para implementar cálculos específicos, como a lógica de histerese no controle térmico. Ao importar variáveis do Data Source Modbus, o Meta processou as informações diretamente no supervisão, garantindo maior flexibilidade e reduzindo a carga de processamento no Arduino. Essa abordagem mostrou-se eficiente, permitindo ajustes dinâmicos durante os testes e melhorando o desempenho geral do sistema.

de transmissão, velocidade necessária de atualização e custo de implementação. Abaixo foi elaborada uma pirâmide representando em verde as principais camadas de uma indústria e entre elas algumas opções de como conectá-las:

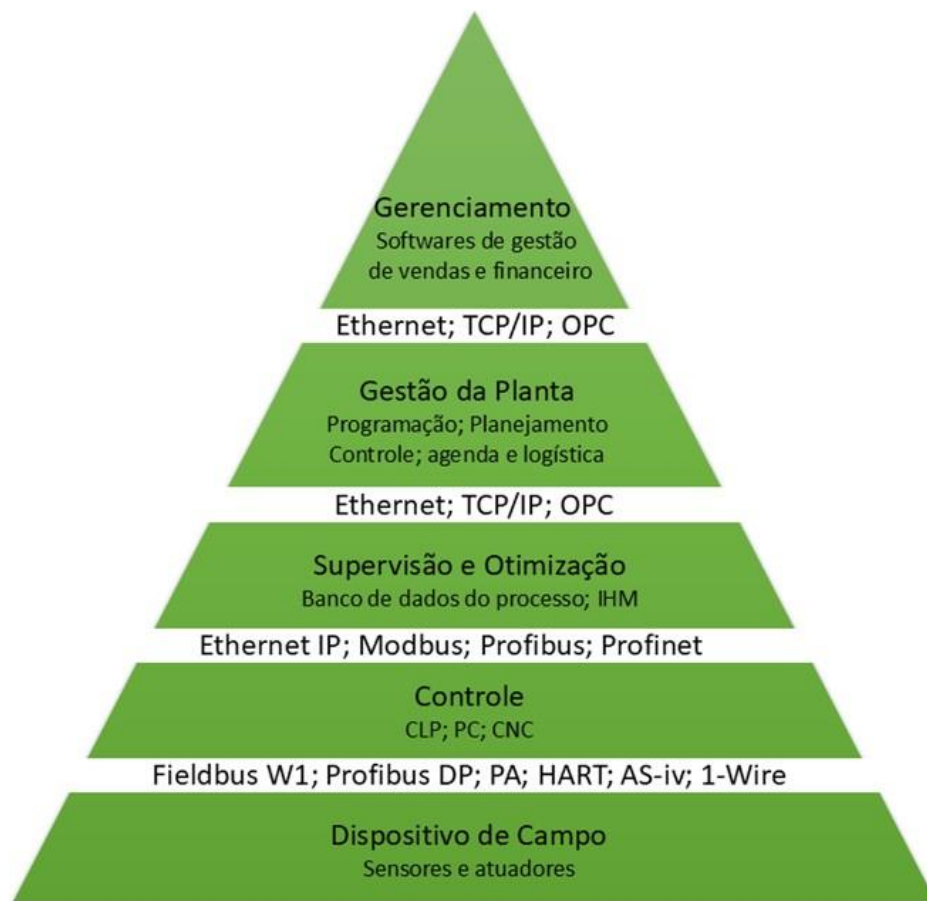


Figura 7: Camadas de Informação

Analisando a pirâmide de baixo para cima, temos como primeira camada o chão de fábrica, aqui chamado de Dispositivo de Campo. Esta camada contempla os sensores e atuadores presentes nas máquinas, e suas leituras são transmitidas em alta velocidade para a camada superior, a de Controle. Para fazer esta transmissão são utilizados protocolos que prezam pela velocidade e não pela quantidade de dados. As informações trocadas são principalmente valores de leitura e escrita, identificadores de dispositivos e até informações sobre a integridade do item.

A camada de Controle é composta principalmente por CLPs ou placas de controle, ela é responsável por fazer a leitura e controle dos Dispositivo de Campo respeitando os comandos vindos da Supervisão e Otimização. Tipicamente, os CLPs possuem uma receita de execução de tarefas, com parâmetros de produção pré definidos que permitem a máquina operar de forma correta, e alterações nas receitas ou ajustes de produção são feitos por IHMs, Interface Homem Máquina. Neste ponto

a quantidade de informações e a complexidades se tornam maiores, exigindo uma comunicação capaz de transmitir uma grande quantidade de dados de forma confiável e organizada.

As duas camadas superiores, Gerenciamento e Gestão da Planta, são no geral afastadas fisicamente das camadas inferiores, são servidores alocados em escritórios que podem ser acessados à distância, muitas vezes simplesmente acessando um site. Neste ponto as informações de interesse deixam de ter este formato industrial, no sentido de que não são mais sensores e atuadores simplesmente, mas sim a quantidade de matéria prima sendo transformada em novos produtos, custos de manutenção e outras informações de interesse da gestão de cada empresa. Não é o caso do trabalho desenvolvido, mas entender as camadas superiores é entender as demandas da empresa e promover melhorias estratégicas nas linhas de produção.

Vale ressaltar que no cenário atual existem tecnologias que não seguem mais esta divisão de camadas, sendo possível atuar diretamente dos Dispositivos de Campo através da camada de Gerenciamento, isto permite, por exemplo, atrelar a taxa de produção e configuração de cada máquina com base em estudos econômicos e estratégias de mercado.

Este trabalho abrange as 3 camadas inferiores, sendo o sinótico do SCADA BR a camada de Supervisão e Otimização, conectada via Modbus Serial ao Arduino Uno que controla dos dispositivos de campo, sensores de temperatura e atuadores.

2.8 1-Wire

O protocolo 1-Wire foi desenvolvido pela Dallas Semiconductor e é amplamente utilizado em sensores como o DS18B20. Apesar de sua baixa velocidade de comunicação, essa característica não compromete a precisão na medição de temperatura, essencial para este trabalho. O sensor foi configurado na resolução mínima de 9 bits, suficiente para as análises realizadas, reduzindo o tempo de resposta sem perda de precisão relevante.

2.9 Sensores de Temperatura DS18B20

O sensor digital DS18B20 é um dos dispositivos mais comuns que utiliza o protocolo 1-Wire. A resolução do sensor pode ser configurada entre 9 e 12 bits, impactando diretamente a precisão das medições. A temperatura medida é expressa em graus Celsius, e é possível realizar a conversão para Fahrenheit programaticamente.

Cada sensor DS18B20 possui uma ROM de 64 bits com um código único. Os 8 primeiros bits representam o '*Family Code*' do dispositivo, enquanto os últimos 8 bits são utilizados para o CRC (*Cyclic Redundancy Check*), que verifica a integridade dos dados. Graças a essa identificação exclusiva, é possível conectar múltiplos dispositivos na mesma linha de dados, utilizando apenas um fio para a comunicação.

2.10 Modbus Serial

O protocolo Modbus Serial, amplamente utilizado na indústria, suporta modos de comunicação *Half-Duplex* e *Full-Duplex*. No modo *Half-Duplex*, utilizado neste projeto, os dispositivos enviam e recebem dados de forma alternada, simplificando o hardware e reduzindo custos. Já o modo *Full-Duplex*, apesar de permitir comunicação simultânea, exige maior complexidade de implementação. A escolha do modo *Half-Duplex* foi suficiente para as demandas deste trabalho.

O protocolo Modbus organiza as informações em quatro categorias principais:

- *Input Status* - São variáveis booleanas de entrada que podem ser apenas lidas. Exemplo: verificar se um sensor foi ativado.
- *Coil* – Representa variáveis booleanas que podem ser lidas e escritas, permitindo o controle de saídas digitais, como o acionamento de um relé.
- *Input Register* – Armazena valores analógicos de entrada para leitura, como a medição de temperatura.
- *Holding Register* - Permite leitura e escrita de valores analógicos, como ajustar setpoints ou controlar saídas moduláveis, como PWM (*Pulse Wave Modulation*).

A indexação dos registros pode ser baseada em 0 ou 1, dependendo da configuração do software. Por exemplo, ao controlar dois relés e ler o estado de um sensor de nível, os relés poderiam ser mapeados nas posições 0 e 1 na categoria *Coil*, enquanto o sensor seria um *Input Status* na posição 0.

O protocolo Modbus oferece flexibilidade e possui uma vasta documentação e uma comunidade ativa, facilitando o aprendizado e a especialização na implementação de redes Modbus. Para este projeto, os conceitos básicos apresentados são suficientes para compreender sua aplicação.

2.11 Arduino

O Arduino é uma plataforma OpenSource amplamente utilizada em projetos educacionais, experimentais e industriais. Entre os modelos mais comuns estão o Arduino Nano, Mega 2560 e Due, cada um com características específicas. Para este trabalho, foi escolhido o Arduino Uno R3, conhecido por sua versatilidade e equilíbrio entre custo e funcionalidade. Com entradas e saídas digitais e analógicas, além de suporte ao protocolo Modbus Serial, o Uno R3 atendeu perfeitamente às necessidades do projeto, demonstrando-se eficiente na coleta de dados e acionamento de relés. Sua ampla comunidade também contribui com suporte e bibliotecas, facilitando a implementação de soluções.

2.12 Pastilha Peltier

As pastilhas Peltier são dispositivos termoeletricos usados para controle térmico, capazes de gerar um fluxo de calor entre suas faces quando uma corrente elétrica é aplicada. Elas são utilizadas em uma variedade de aplicações, como refrigeração de eletrônicos e pequenos refrigeradores, como bebedouros. A estrutura física interna da pastilha é composta por junções P-N, assim como ilustrado na figura 8:

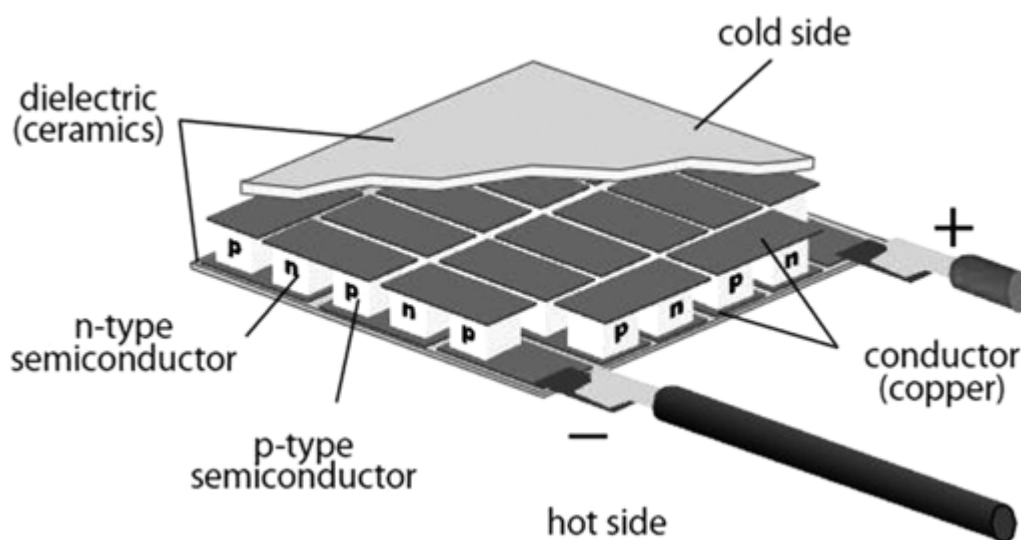


Figura 8: Estrutura física Interna Peltier.

Neste trabalho, as pastilhas Peltier foram escolhidas devido ao seu custo acessível e facilidade de implementação. Elas permitem o controle térmico de maneira eficaz, podendo aquecer ou res-

friar uma mesma face alternando o sentido da corrente aplicada. O Arduino controla as pastilhas Peltier por meio de relés, determinando quando devem aquecer ou resfriar, com base nas leituras de temperatura e nas configurações do SCADA BR.

3 Metodologia

Com as tecnologias apresentadas nos capítulos anteriores foi organizado o roteiro de execução do projeto. O primeiro passo foi dimensionar e definir os atuadores térmicos, seguido de testes de acionamento dos relés pelo Arduino e só então foi estabelecida a conexão com a plataforma SCADA BR.

3.1 Sistema Térmico

Como mencionado, o primeiro passo foi especificar as pastilhas Peltier, portanto é necessário compreender suas características físicas e operacionais, sendo assim possível definir o *range* esperado do sistema. O modelo utilizado foi a TEC1-12706, modelo amplamente disponível no mercado nacional. Esta pastilha consegue sustentar uma diferença de temperatura entre suas faces de 70°C quando alimentada em 12V.

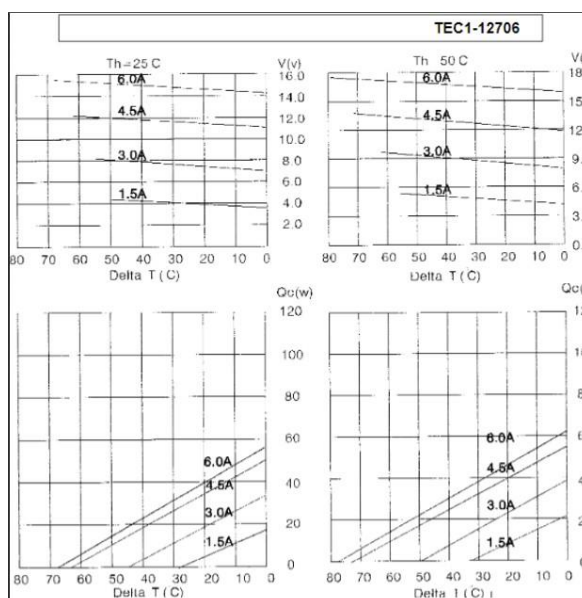


Figura 9: Curvas de desempenho TEC1-12706 segundo o datasheet da HB Corporation.

Ainda mencionando a Figura 9, a transferência máxima de potência calorífica é em torno de 60W, e ocorre quando não há diferença de temperatura entre as faces, já quando atinge o seu limite do Delta T, a potência transferida é praticamente nula. Para os cálculos de expectativa de-

sempenho foi adotado o meio termo, ou seja, 30W de transferência calorífica por placa. Logo de início foi definido que seriam utilizadas duas placas, uma de cada lado do tanque de controle e cada uma tendo o seu dissipador de calor ventilado.

Observando os limites da placa, optou-se por utilizar 15°C como temperatura mínima e a máxima de 80°C, como o recipiente acrílico utilizado tem capacidade de 1 litro, já é possível realizar uma estimativa de tempo necessário para que a planta alterne entre o valor mínimo e máximo:

- Massa da água: 1kg,
- Calor específico da água: 4180J/Kg°C
- Variação de temperatura: 65°C (Inicial: 15°C, Final: 80°C)
- Potência calorífica: 30W
- Quantidade de calor necessária:

$$Q = mc\Delta T = 271700J \quad (1)$$

- Tempo necessário:

$$t = \frac{Q}{60 * P} = 150,94 \text{ min} \quad (2)$$

Levando praticamente duas horas e meia para conseguir alternar entre os extremos, optou-se por realizar os testes de desempenho com apenas 250ml de água, o que reduz o tempo em 4 vezes e já permite observar o funcionamento do controle.

Para implementar as pastilhas Peltier, é necessário utilizar dissipadores com ventilação, um tanque metálico de pequena capacidade acoplado com pasta térmica e uma bomba para circulação do fluido, assim como mostrado abaixo:

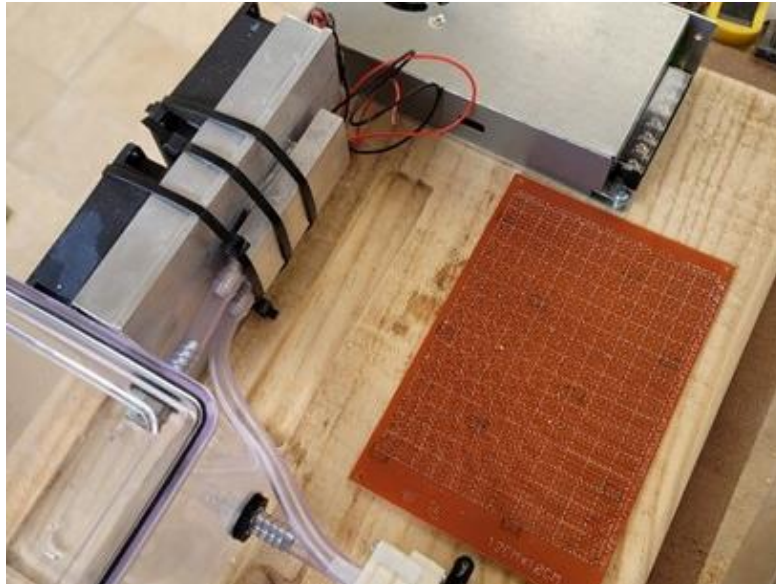


Figura 10: Sistema Montado com apenas uma pastilha.

3.2 Sensores e Atuadores

Para uma melhor observação do status da planta, foram utilizados 3 pontos de medição de temperatura, um no fundo do pote acrílico, outro no tanque de controle e por fim um na placa de dissipação de calor. O primeiro sensor, T1, fornece a principal leitura de interesse, que é a temperatura do líquido a ser controlado. O segundo e terceiro sensores, T2 e T3, foram adicionados respectivamente para verificar se o tanque metálico está com a temperatura próxima ao alvo e o terceiro para validar a configuração do dissipador de calor, pois se o mesmo assumir temperaturas mais altas que o esperado, seria um indicativo de saturação. Os valores T2 e T3 também podem ser utilizados para uma estimativa da diferença de temperatura entre as faces das pastilhas Peltier.

Como atuadores temos 3 principais itens, a bomba d'água, a ventilação e as pastilhas Peltier, sendo todos eles acionados por um relé de 4 canais, dos quais 2 são utilizados para alternar o sentido da corrente de alimentação das pastilhas e os dois são canais individuais. O projeto ainda conta com 3 leds que indicam em azul se está resfriando, vermelho aquecendo e verde se está em *standby*, além de um potenciômetro que pode ser utilizado para definir a temperatura alvo após ativação de um *switch*.

Para o controle das pastilhas Peltier, foi montado um circuito de Ponte H utilizando dois relés. Essa configuração permitiu a inversão do sentido da corrente elétrica aplicada às pastilhas, possibilitando alternar entre os modos de aquecimento e resfriamento. A utilização de relés garantiu um acionamento seguro e eficaz, evitando curtos-circuitos durante a mudança de

polaridade. Esse método foi escolhido por sua simplicidade e eficiência, sendo suficiente para atender às demandas do projeto. Além disso, os relés foram integrados ao sistema supervisório por meio do Arduino, que determinava os estados dos relés com base nos comandos enviados pelo SCADA BR.

3.3 Aquisição de dados em tempo real

Para a coleta de dados e acionamento de saídas, optou-se pela utilização do Arduino Uno R3, visto que a placa possui capacidade de processamento de sobra para tal aplicação. A rotina utilizada no Arduino foi feita com o intuito de configurar o dispositivo como um escravo do SCADA. Foram utilizadas duas bibliotecas como base do código, a biblioteca Modbus e a DallasTemperature.

O pacote Modbus possui funções que permitem utilizar a porta serial do Arduino Uno como uma conexão Modbus Serial, de modo que o usuário consegue indicar facilmente o tipo de cada variável, sua posição e ajustes na conexão. Já a biblioteca DallasTemperature foi utilizada para a leitura e identificação dos sensores de temperatura, estabelecendo uma comunicação 1-Wire e convertendo as informações para a escala Celsius.

Nesta aplicação o Arduino não possui poder de controle, ele só envia os dados coletados e recebe os comando do SCADA BR. O código utilizado no Arduino junto com vídeos demonstrando o funcionamento e configuração da planta, podem ser encontrados no link do Github: [luanbruno71/SCADABR- ARDUINO](https://github.com/luanbruno71/SCADABR-ARDUINO).

3.4 Sistema Supervisório e Lógica de Operação

Para configurar o SCADA BR, o primeiro passo foi criar um Data Source Modbus Serial, mapeando cada variável nas posições e categorias definidas pelo Arduino. Com os dados devidamente coletados e identificados, foi estabelecido um Data Source Meta, que, conforme explicado anteriormente, permite a utilização de scripts para manipulação e processamento de variáveis. Nessa etapa, todas as variáveis de interesse do Data Source Modbus foram importadas para o Meta, garantindo que os cálculos e operações sejam realizados diretamente pelo software SCADA BR. Para escrever os valores calculados pelo Meta no Arduino é utilizado a ferramenta de Point Links, que simplesmente copia o valor de uma variável para outra, assim, de forma indireta, o Data Source Meta consegue controlar os atuadores conectados no Arduino.

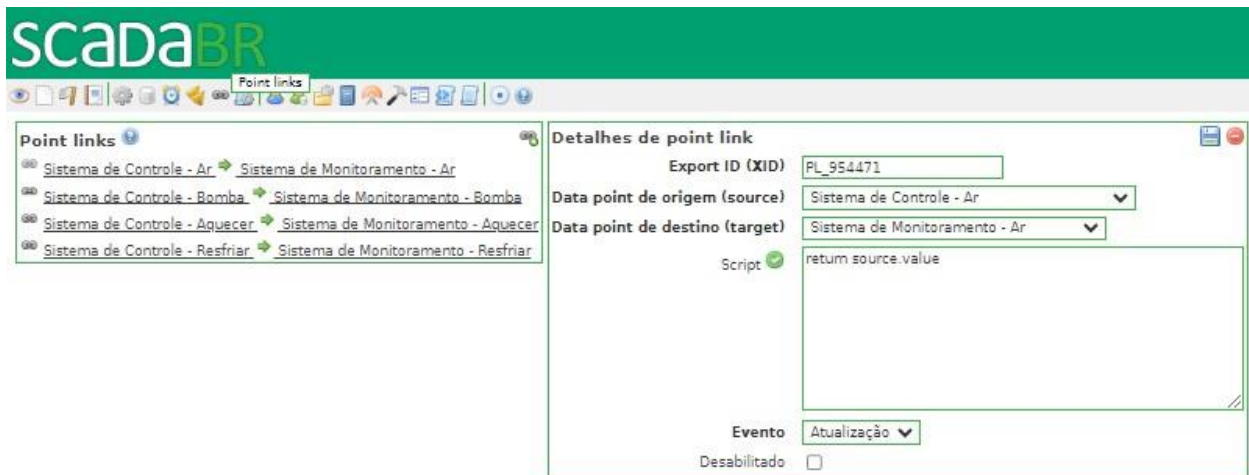


Figura 11: Point Link.

O controle implementado possui a opção de se utilizar histerese, ou seja, após atingir a temperatura alvo, uma margem de valor é considerada aceitável. Por exemplo, se o usuário escolher a temperatura alvo de 50°C com histerese de 1°C, o supervisório decide aquecer ou resfriar até atingir exatamente 50° e depois disso só vai acionar o controle se a temperatura medida por T1 for menor que 49°C ou maior que 51°C.

Para realizar o controle de aquecimento e resfriamento, são utilizadas as mesmas pastilhas Pel-tier, conectadas em um circuito de Ponte H com dois relés. Essa configuração permite a energização das pastilhas ao ativar um relé e desativar o outro, e ao inverter a ordem dos relés, a polaridade da tensão aplicada é revertida. Isso possibilita a mudança entre os modos de aquecimento e resfriamento, evitando curtos-circuitos nos terminais da fonte, mesmo se os dois relés estiverem ativados ou desativados simultaneamente.

Cada atuador é acionado por uma rotina individual, tendo cada um a sua própria lógica de funcionamento. A bomba é ativada somente quando é necessário aquecer ou resfriar o fluido no recipiente acrílico, já a ventilação é ligada em dois cenários, o primeiro é sempre que a função resfriar for acionada, já que nesse caso a pastilha vai resfriar o tanque metálico ao mesmo tempo que aquece o dissipador, e quando o sistema está em standby mas o dissipador está pelo menos 10°C mais quente que o tanque metálico.

As funções de aquecer ou resfriar são acionadas para que T1 atinja a temperatura alvo, mas também são acionadas caso o dispositivo stema esteja em standby mas o tanque metálico tenha uma diferença superior a 5°C em relação ao alvo. O segundo cenário de ativação destas funções

se mostrou necessário porque, quando em standby, o sistema não bombeia água. Nesse estado, a pastilha é desligada, tornando-se um condutor passivo, o que resulta em transferência de calor entre o tanque metálico e o dissipador. Essa falta de circulação faz com que a temperatura do tanque metálico seja significativamente alterada, especialmente em comparação com a água no recipiente principal. Como consequência, ao atingir o limite da histerese, a temperatura da água bombeada para o tanque acrílico muitas vezes não corresponde ao valor esperado. Isso ocasiona situações em que o sistema inicialmente esfria quando deveria aquecer, ou vice-versa, aumentando o tempo necessário para retornar à temperatura alvo. Essa limitação foi mitigada ajustando a lógica de controle para ativar a bomba e estabilizar a temperatura mesmo durante o modo standby.

3.5 Interface Gráfica

Com a transferência de dados já configurada, deu-se início a criação da interface gráfica. O primeiro passo foi criar uma imagem de fundo no formato PNG, preparando os espaços dedicados para cada informação, o resultado foi o seguinte:

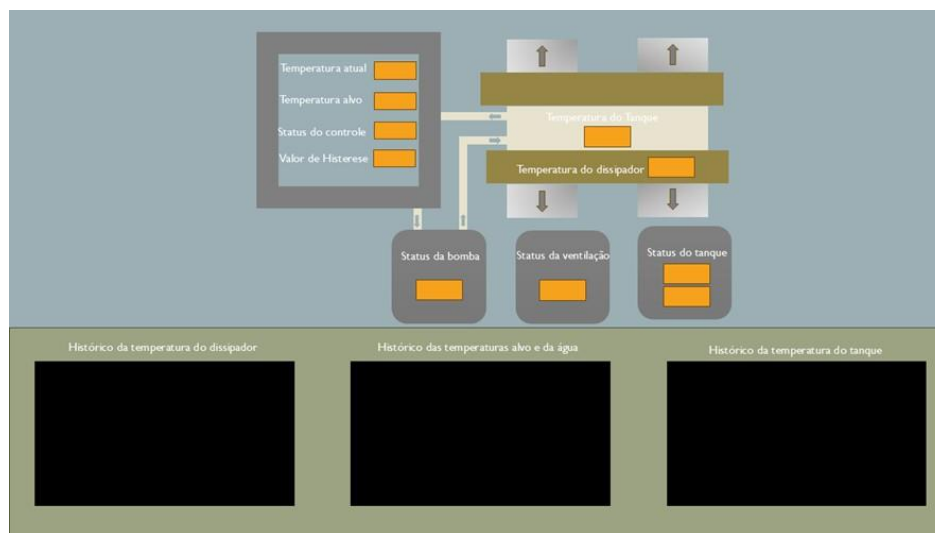


Figura 12: Imagem de fundo para o sinótico.

O próximo passo foi acessar o menu Representação Gráfica no software SCADA BR e inserir cada Data Point e gráfico nos locais previstos.

4 Resultados

Como resultados, destaca-se a elaboração do sinótico capaz de representar e controlar o seu escravo, Arduino, que por sua vez é capaz de coletar os dados necessários e atuar de forma controlada.

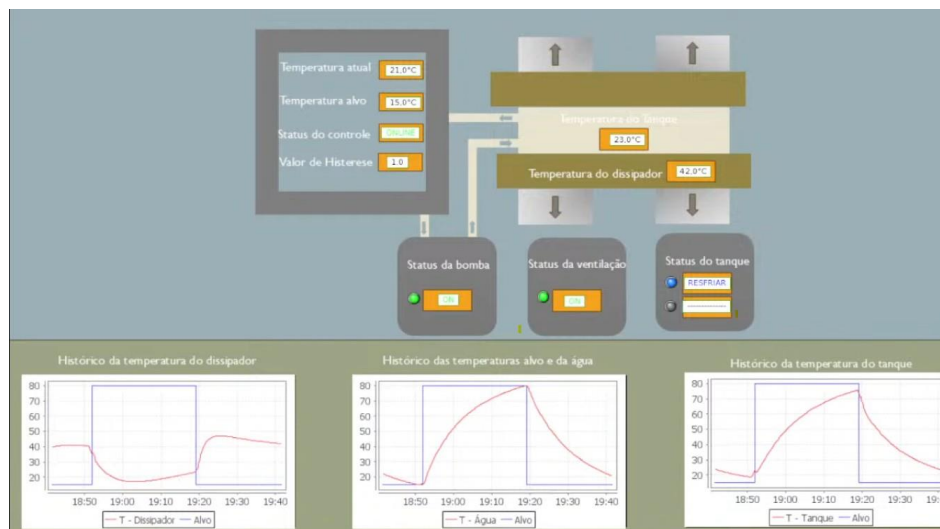


Figura 13: Sinótico Montado.

A Figura 13 apresenta o sinótico montado no SCADA BR, que reúne as informações mais importantes do sistema térmico de forma organizada e intuitiva. Na parte inferior da tela, estão dispostos três gráficos que exibem o histórico das temperaturas em pontos críticos do sistema: o dissipador (à esquerda), o tanque de água principal (ao centro) e o tanque metálico (à direita). Esses gráficos permitem monitorar as variações de temperatura ao longo do tempo, auxiliando na análise de desempenho do controle térmico.

Na parte central do sinótico, são exibidos os status em tempo real de todos os sensores e atuadores. Isso inclui a leitura das temperaturas medidas, o estado dos relés, e informações sobre a bomba de água e as pastilhas Peltier. Essa disposição central facilita a identificação rápida do funcionamento geral do sistema.

No topo do sinótico, é possível ajustar dois parâmetros essenciais para o controle térmico: a temperatura alvo e o valor da histerese. O ajuste direto por meio da interface gráfica torna o sistema flexível e fácil de operar, permitindo ao usuário configurar o comportamento do sistema de acordo com as necessidades específicas.

Essa organização do sinótico permite uma visualização clara e interativa de todo o sistema, combinando dados históricos com controles em tempo real, o que foi fundamental para avaliar o desempenho do projeto e implementar ajustes durante os testes.



Figura 14: Circuito Físico.

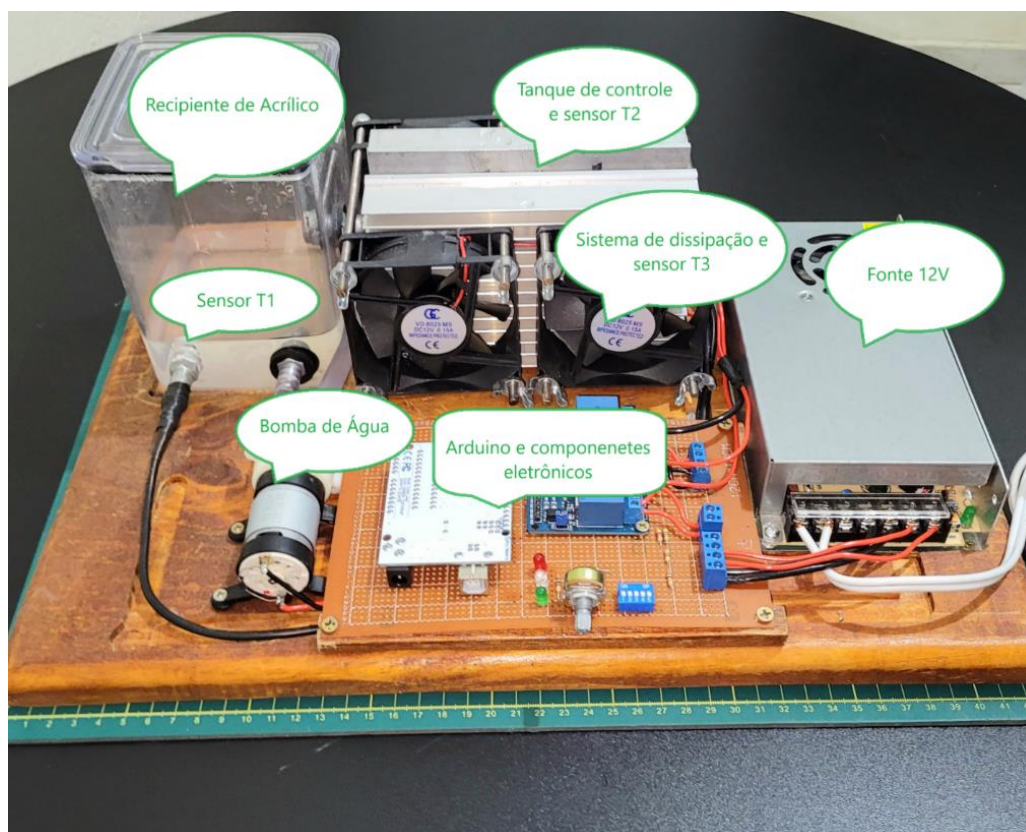


Figura 15: Componentes comentados.

Com o circuito já montado, o projeto cumpriu com os objetivos almejados, permitindo um controle estável em toda a sua faixa de operação. Foram feitos testes utilizando 250ml de água e alimentação 12V, neste contexto o arranjo consegue variar entre o valor máximo e mínimo de temperatura em aproximadamente 30 minutos.

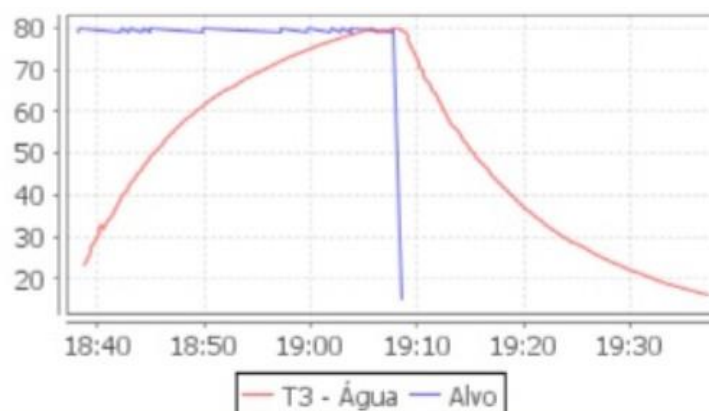


Figura 16: Desempenho com 250ml de água.

A alteração da quantidade de água no recipiente evidenciou que o comportamento da temperatura não apresenta linearidade entre o volume de água e o tempo de transiente. O desempenho com 500 ml foi o seguinte.:

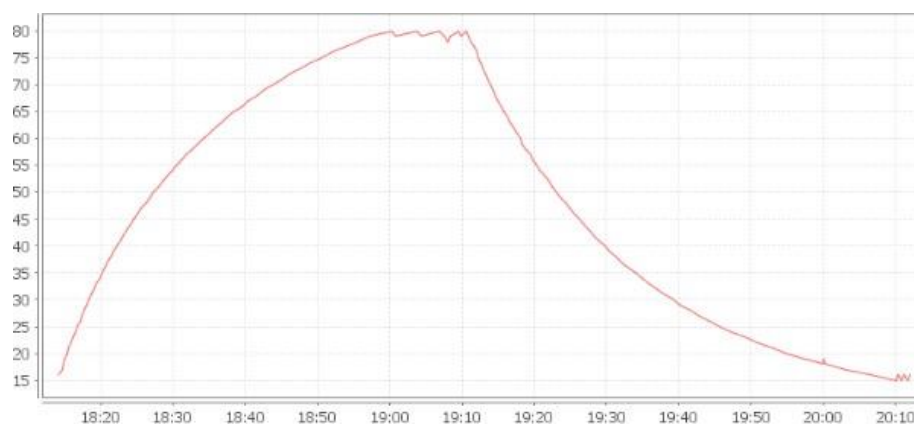


Figura 17: Desempenho com 500ml de água.

Após atingir a temperatura alvo o software aguarda a temperatura variar um valor específico e reativa o sistema térmico. Neste caso o tempo gasto para atingir 80°C foi de 45 minutos e mais aproximadamente 1 hora para retornar para os 15°C.

Para estudar o comportamento em diferentes temperaturas, foram feitos setups progressivos, o

primeiro foi variar a temperatura de 25°C até 70°C, mantendo essa temperatura por 10 minutos e depois resfriar até 15°C. Após atingir a temperatura mínima foi enviado o comando para atingir a temperatura máxima, 80°C, e mantê-la por 20 minutos. O próximo teste foi resfriar novamente até a mínima e de 10 em 10 minutos elevar 10°C na temperatura alvo. Com isso foi possível observar que o controle de funciona de forma adequada em todo o *range* definido.



Figura 18: Gráfico com alterações graduais.

Os testes realizados demonstraram maior chaveamento nas temperaturas extremas, o que era esperado, pois nessas regiões a troca de temperatura com o meio é mais intensa.. O comportamento durante o aquecimento gradual foi similar ao contínuo, mostrando estabilidade nas diferentes faixas de operação. As diferenças observadas entre os valores de tempo medidos e calculados devem-se, principalmente, ao modelamento térmico, que não inclui completamente as perdas para o ambiente, dissipação térmica pelos materiais envolvidos e limitações da eficiência das pastilhas Peltier. Essas discrepâncias destacam a importância de um modelo mais robusto para previsões precisas.

Já o dissipador em nenhum dos testes atingiu temperaturas acima dos 50°C, inclusive quando a temperatura alvo era a mínima, o que representa que a dissipação com arrefecimento foi eficiente para a aplicação.

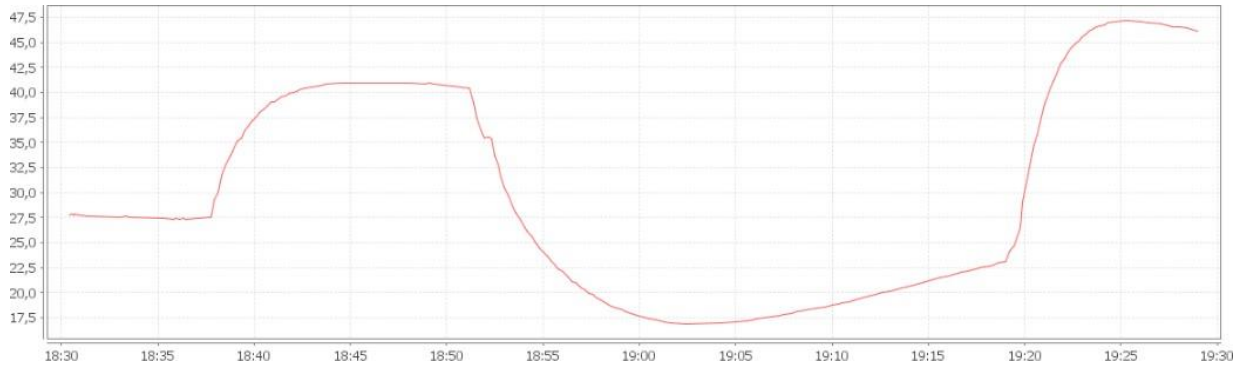


Figura 19: Histórico Dissipador.

A Figura 19 apresenta o histórico das temperaturas do dissipador, evidenciando o comportamento térmico do sistema durante mudanças na temperatura alvo. Quando o sistema é ajustado para resfriar o tanque de água, o dissipador inicialmente esquenta devido à transferência de calor para a face quente da pastilha Peltier. Da mesma forma, ao solicitar o aquecimento do tanque, o dissipador inicialmente esfria, refletindo o funcionamento inverso do ciclo térmico das pastilhas.

O gráfico também destaca que, ao realizar transições entre temperaturas extremas — como de 15°C para 80°C —, o dissipador reduz sua temperatura inicialmente, mas depois a aumenta gradativamente. Isso ocorre porque as pastilhas Peltier mantêm uma diferença de temperatura de até aproximadamente 50°C entre suas faces, e à medida que o tanque se aquece, a temperatura do dissipador deve aumentar para sustentar o gradiente térmico.

Apesar dessas limitações físicas, as pastilhas Peltier demonstraram alta eficiência na aplicação, garantindo o controle térmico do sistema dentro do range definido. O comportamento registrado no dissipador confirma que o sistema é capaz de gerenciar de forma estável as trocas de calor necessárias, mostrando-se adequado para os objetivos do projeto e atendendo às demandas de controle mesmo em cenários desafiadores. Esses resultados validam a escolha das pastilhas Peltier como uma solução eficaz e acessível para este tipo de aplicação térmica.

A fim de melhorar o desempenho apresentado, podem ser utilizadas pastilhas Peltier de maior potência, acompanhadas de um sistema de dissipação de maior eficiência, como ventoinhas de maior desempenho. Vale observar que a alteração para pastilhas de maior potência exige que seja especificado ou um relé de maior capacidade, ou que os circuitos fossem montados de forma individual, tendo cada pastilha o seu par de relé. Nos testes feitos, notou-se que adicionar duas

pastilhas de mesma potência lado a lado, causa sobreaquecimento nos dissipadores e afeta significativamente o desempenho nas faixas extremas de operação, tendo como resultado final um desempenho melhor na faixa de 25 a 60°C, mas sendo incapaz de resfriar o sistema até 15°C.

5 Conclusão

O presente trabalho atingiu seus objetivos ao desenvolver e implementar um sistema de controle térmico utilizando pastilhas Peltier, Arduino UNO e o supervisório SCADA BR. O sistema demonstrou estabilidade e repetibilidade em seu funcionamento, controlando a temperatura de forma precisa dentro da faixa definida e apresentando previsibilidade em relação ao tempo necessário para mudanças de temperatura. Esses resultados validam a aplicabilidade da solução proposta, tanto em contextos didáticos quanto em pequenos sistemas industriais.

Os testes realizados evidenciaram que, embora o sistema funcione de maneira eficiente na maior parte das condições, existem limitações relacionadas à capacidade das pastilhas Peltier e ao modelamento térmico empregado. Em situações de alta troca de calor com o meio, a eficiência do sistema é reduzida, destacando a importância de melhorias no isolamento térmico e na capacidade dos atuadores.

Além disso, o uso do SCADA BR provou ser uma ferramenta de supervisão robusta e acessível, permitindo uma integração simples e eficiente com o Arduino, além de oferecer uma interface gráfica interativa para monitoramento e controle. Esse aspecto destaca a importância de softwares open source no aprendizado e desenvolvimento de soluções práticas, especialmente para estudantes e pequenos projetistas.

Do ponto de vista didático, o trabalho é uma excelente introdução a conceitos amplamente utilizados na indústria, como protocolos de comunicação, controle supervisório e integração de hardware. Ele também serve como um exemplo prático de como tecnologias acessíveis podem ser empregadas para resolver problemas reais, trazendo inovação para contextos educacionais.

Por fim, este projeto abre portas para aplicações em áreas como controle ambiental, automação residencial e equipamentos laboratoriais de baixo custo. Além disso, sua modularidade permite adaptações para diferentes necessidades, como o uso de sensores e atuadores mais avançados, integração com sistemas baseados em IoT ou escalabilidade para aplicações industriais mais robustas.

6 Trabalhos Futuros

Este trabalho apresenta diversas oportunidades para aprimoramento e expansão. Um dos principais desafios observados foi a diferença entre os valores medidos e calculados durante o controle térmico, resultado de perdas térmicas para o ambiente e limitações no modelamento atual. Assim, um próximo passo seria o desenvolvimento de um modelo térmico mais robusto, que leve em conta essas perdas e a eficiência dos componentes, permitindo maior precisão no controle e nas previsões.

Outro avanço significativo seria a implementação de algoritmos para prever, com maior precisão, o tempo necessário para alcançar a temperatura alvo. Isso poderia ser feito a partir de modelos dinâmicos mais sofisticados, como funções de transferência ou simulações térmicas em tempo real, aplicáveis a diferentes condições de operação.

Adicionalmente, o sistema de comunicação utilizado, baseado em Modbus Serial, pode ser aprimorado. A integração de técnicas de comunicação mais rápidas, como Modbus TCP/IP ou protocolos sem fio, proporcionaria maior agilidade na troca de dados e flexibilidade para aplicações remotas. Isso possibilitaria uma operação mais eficiente e escalável, além de abrir caminho para integrações futuras com tecnologias IoT.

Essas melhorias não apenas aumentariam a precisão e a eficiência do sistema, mas também ampliariam suas possibilidades de aplicação, tornando-o mais competitivo em cenários industriais e educacionais.

7 Referências

Documentação Arduino Uno Rev3 [online]. 2023. Acesso em: 30 out. 2024. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>.

Branquinho, M. A., Seidl, J., Moraes, L. C. d., Branquinho, T. B., Junior, J. d. A. (2014). *Segurança de Automação Industrial e SCADA*. Brasil: Elsevier Editora Ltda..

BERGMAN, Theodore L. et al. *Introduction to heat transfer*. John Wiley e Sons, 2011.

CALLEN, Herbert B. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. John wiley e sons, 1991.

DREBUSHCHAK, V. A. The peltier effect. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 91, p. 311-315, 2008.

DALLAS SEMICONDUCTOR CORPORATION. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire

Digital Thermometer. Acesso em: 30 out. 2024. Disponível em:

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html>.

DA SILVA, Ana Paula Gonçalves; SALVADOR, Marcelo. O que são sistemas supervisórios?. São Paulo, 2005.

FOVINO, Igor Nai et al. Design and implementation of a secure modbus protocol. In: Critical Infrastructure Protection III: Third Annual IFIP WG 11.10 International Conference on Critical Infrastructure Protection, Hanover, New Hampshire, USA, March 23-25, 2009, Revised Selected Papers 3. Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 83-96.

GALLOWAY, Brendan; HANCKE, Gerhard P. Introduction to industrial control networks. IEEE Communications surveys e tutorials, v. 15, n. 2, p. 860-880, 2012.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio; ORLANDO, Tailan. Comparação entre três tipos de sensores de temperatura em associação com arduíno. 2016.

MIRANDA, Juliano Coêlho; PEREIRA, Paulo Henrique Cruz; DE FREITAS ANDRADE, Mateus. Supervisão e Controle de Processos Industriais Através do Scada-BR. In: IX Semana de Ciência e Tecnologia-CEFET-MG. 2013.

SHUKLA, Paavni et al. Design and development of a MODBUS automation system for industrial applications. In: 2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA). IEEE, 2017. p. 515-520.

SOUZA, Vitor Amadeu. Projetos Com Arduino Ii. Clube de Autores, 2015.

UBALDO, Celso Dell Anhol. Projeto Caracol. 2020. Acesso em: 30 out. 2024. Disponível em: <https://github.com/celsou/projeto-caracol>.

8 Anexo

Com o propósito de melhor auxiliar a reprodução do trabalho, segue recomendação de montagem e lista de material utilizado neste trabalho.

8.1 Anexo A: Esquemas Elétrico

Foi disponibilizado na página do Github o código utilizado no Arduino, o json para o SCADA BR e o circuito simulado no Thinkercad. Abaixo segue figura com uma simulação do projeto. No aplicativo não havia disponibilidade de Pastilhas Peltier, ventiladores, bomba d'água ou o sensor de fato usado, então o esquema é apenas uma representação, sendo necessário ficar atento as

observações e a forma correta de montar cada dispositivo.

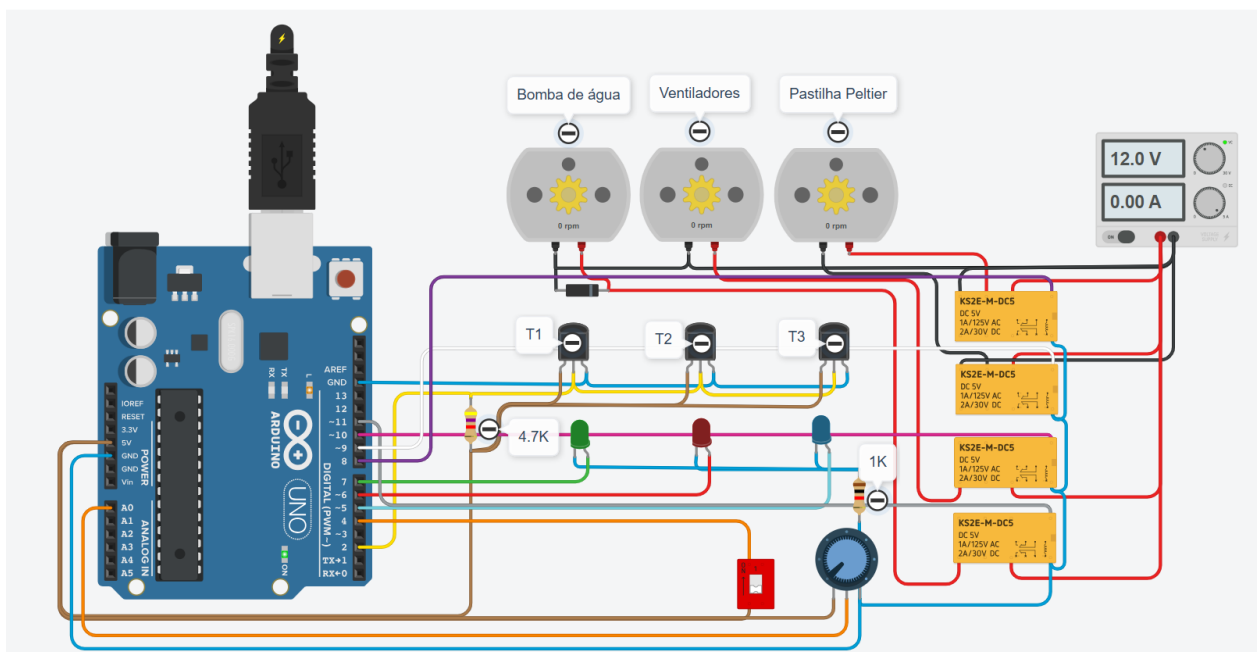


Figura 20: Circuito simulado no Thinkercad.

8.2 Anexo B: Material e Orçamento

A tabela abaixo é uma aproximação do valor gasto, alguns itens não foram comprados para uso específico do projeto e serão retulizados em trabalhos pessoais futuros.

Tabela I: Lista de Materiais

Item	Quantidade	Valor Unitário
Arduino Uno	1	R\$ 50,00
Dissipador de calor 40x80x12	1	R\$ 35,00
Fonte 12V 30A	1	R\$ 30,00
Mini Bomba de Água 12V DC	1	R\$ 18,00
Dissipador de calor 104mm	2	R\$ 20,00
Módulo Relé com 4 canais	1	R\$ 22,99
Pote Hermético	1	R\$ 20,00
TEC1-12706 12V 6A	2	R\$ 15,38
Sensor de temperatura digital DS18B20	3	R\$ 11,90

Ventiladores	4	R\$ 8,00
Placa Fenolite Perfurada	1	R\$ 3,90
Total:		R\$ 318,35

Deve-se considerar um gasto adicional com fios, bornes para fixação de cabos e também encaixes de pinos, no caso do projeto também foi utilizado potenciômetro, chave seletora e resistores nos sensores de temperatura e nos LEDs, que também precisam ser considerados. Como gastos menores também devem ser consideradas as mangueiras, veda rosca, fita isolante, borrachas de vedação e encaixes para as mangueiras. Os itens listados neste parágrafo ou encontravam-se disponíveis ou foram comprados em kits, sendo o valor total destes itens inferior a R\$50,00.

Para a execução do projeto foram utilizadas ferramentas de uso comum, alicate universal, chave philips e ferro de solda. Como pode ser observado na Figura 14, os ventiladores foram fixados com barras de rosca, porcas e borboletas, para executar esse trabalho é necessário perfurar ambos os dissipadores, sendo necessária uma furadeira. As barras roscadas foram cortadas utilizando uma microretífica, mas uma serra arco desempenha perfeitamente o trabalho. No pote de acrílico foram feitas 3 aberturas, todas utilizando uma microrretífica com broca do tipo fresa, entretanto não é necessária a utilização desta ferramenta e nem a do pote acrílico, podendo este ser substituído por recipientes plásticos genéricos.

Por fim, a montagem do sistema foi feita em madeira, utilizando principalmente a ferramenta tupia como fresa. Foram feitos rebaixamentos para um melhor encaixe de todos os itens, sendo que a região placa conta também com uma elevação, permitindo que todos os fios pudessem ser posicionados sem esmagamentos.