



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL ESTEVÃO RABELO

**SISTEMA EMBARCADO COM A POSSIBILIDADE DE
ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE
UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SEM A NECESSIDADE
PRÉVIA DE REGRAVAÇÃO DO *FIRMWARE***

VIÇOSA
DEZEMBRO DE 2020

GABRIEL ESTEVÃO RABELO

SISTEMA EMBARCADO COM A POSSIBILIDADE DE
ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE UM
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SEM A NECESSIDADE PRÉVIA DE
REGRAVAÇÃO DO *FIRMWARE*

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para obtenção dos créditos da disciplina ELT402 - Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Denilson Eduardo Rodrigues

VIÇOSA

DEZEMBRO DE 2020

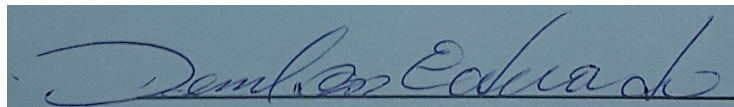
GABRIEL ESTEVÃO RABELO

**SISTEMA EMBARCADO COM A POSSIBILIDADE DE
ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE
UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SEM A NECESSIDADE
PRÉVIA DE REGRAVAÇÃO DO *FIRMWARE***

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para obtenção dos créditos da disciplina ELT402 - Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 07/12/2020.

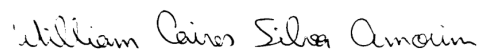
COMISSÃO EXAMINADORA:



Dr. Denilson Eduardo Rodrigues -
Orientador
Universidade Federal de Viçosa - UFV



M.Sc. Rafael Iria Rodrigues - Membro
Universidade Federal de Viçosa - UFV



M.Sc. William Caires Silva Amorim -
Membro
Universidade Federal de Viçosa - UFV

Dedico esse trabalho ao meu pai, Eduardo, e à minha mãe, Kátia, por terem me apoiado nos momentos mais difíceis e por sempre terem me impulsionado em direção aos meus sonhos

Agradecimentos

A Deus, por ter iluminado meus caminhos e me conduzido em direção àquilo que realmente importa.

Aos meus pais, Eduardo e Kátia, fonte da minha inspiração, por terem sido meus maiores incentivadores e por terem acreditado em mim desde o princípio.

Às minhas irmãs, Izabela e Eduarda, pela união indissolúvel e por terem me apresentado a ternura da vida.

À Marina, por ser apoio nas dificuldades, auxílio nas decisões e alegria nas comemorações.

Aos amigos de Viçosa, por fazerem parecer menos assustadores os desafios do caminho.

Aos meus avós, tios, tias e toda a família por terem confiado em mim e se orgulharem das minhas conquistas como se fossem suas próprias.

Aos docentes pela transferência de conhecimento.

*“A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria”
(São Tomás de Aquino)*

Resumo

O controle de temperatura, regido pelo trânsito de energia térmica entre dois corpos de diferentes temperaturas, é muito aplicado em sistemas industriais, residenciais e comerciais, uma vez que a variável temperatura exerce importante fator nos diversos processos. Entre as metodologias de controle de temperatura, pode-se destacar o controle *on-off*, que apresenta características de simplicidade e baixo custo, sendo indicados para processos onde não há necessidade de manutenção da variável em um valor com extrema precisão. As aplicações práticas vem sendo possibilitadas com o uso de sistemas embarcados, utilizando microcontroladores em uma placa de circuito impresso com sensores e atuadores, constituindo o sistema de controle digital. Este trabalho apresenta a implementação de um sistema embarcado para monitoramento e controle *on-off* de temperatura de um *freezer* por meio de uma placa de circuito impressa. Utilizou-se um microcontrolador de 8 bits, com comunicação serial USB de modo que o usuário pudesse ajustar os parâmetros de controle, atualizando o *firmware*. O objetivo central é o desenvolvimento da metodologia de controle e do código a ser implementado no microcontrolador, com enfoque na comunicação com o usuário por meio do USB, permitindo a alteração dos parâmetros principais do sistema, o que torna o processo de atualização dos parâmetros de controle mais rápido e prático. É apresentada uma revisão acerca dos sistemas embarcados e das metodologias de controle de temperatura que são geralmente aplicadas. O fluxograma geral e todos os processos subjacentes são detalhados, enfatizando as especificações do código desenvolvido. O código foi desenvolvido na linguagem C por meio do ambiente de desenvolvimento integrado do programador MikroC PRO e simulado no *software* Proteus. Ao longo deste trabalho, os resultados das simulações são apresentados a fim de demonstrar a aplicabilidade dos métodos de controle e seus desempenhos. A estrutura de código desenvolvida permitiu alteração dos parâmetros de controle sem interrupção do código, além de permitir a verificação dos erros por parte do usuário por meio de esquema de LED's. Verificou-se a precisão da lógica *on-off*, permitindo manter a temperatura dentro da faixa especificada pelo usuário.

Palavras-chaves: Sistema embarcado, Controle de temperatura, Controle *on-off*, Microcontrolador PIC18F2550.

Abstract

Temperature control, governed by the transit of thermal energy between two bodies from different installations, is widely applied in industrial, residential and commercial systems, since the temperature variable plays an important factor in the various processes. Among the methodologies of temperature control, we can highlight the on-off control, which presents characteristics of simplicity and low cost, being indicated for processes where there is no need to maintain the variable in a value with extreme precision. Practices have been made possible with the use of embedded systems, using microcontrollers on a printed circuit board with sensors and actuators, constituting the digital control system. This work presents the implementation of an embedded system for monitoring and on-off temperature control of a freezer by means of a printed circuit board. An 8-bit microcontroller was used, with USB serial communication so that the user can adjust the control parameters, updating the firmware. The central objective is the development of the control methodology and code to be implemented in the microcontroller, with a focus on communication with the user through the USB, allowing the alteration of the main parameters of the system, which makes the process of updating the parameters of faster and more practical control. A review of the embedded systems and the temperature control methodologies that are applied is presented. The general flowchart and all the underlying processes are detailed, emphasizing the specifications of the code developed. The code was developed in the C language through the development environment integrated with the MikroC PRO programmer and simulated in the Proteus software. Throughout this work, the results of the simulations are necessary in order to demonstrate the applicability of the control methods and their performance. A code structure defined as changing control parameters without interrupting the code, in addition to allowing error checking by the user through an LED scheme. The accuracy of the on-off logic was verified, allowing the temperature to be kept within the range of the range by the user.

Keywords: Embedded system, Temperature control, On-off control, PIC18F2550 microcontroller

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama de um sistema de controle em malha aberta. | 17 |
| Figura 2 – Diagrama de um sistema de controle em malha fechada. | 17 |
| Figura 3 – Diagrama de Bode para um controlador (a) atraso de fase e (b) avanço de fase. | 18 |
| Figura 4 – Estrutura de um controlador clássico PID. | 19 |
| Figura 5 – Diagrama de um sistema de controle digital em malha fechada. | 21 |
| Figura 6 – Curvas características T vs R para os termistores PTC e NTC. | 23 |
| Figura 7 – Curvas reais para os termistores PTC da empresa <i>muRata Manufacturing</i> | 24 |
| Figura 8 – Modelo de medição de temperatura com termopar. | 25 |
| Figura 9 – Relação entre sensor e atuador no controle de um processo. | 25 |
| Figura 10 – Diagrama de um sistema embarcado com microcontrolador. | 26 |
| Figura 11 – Princípio de operação termodinâmico de um refrigerador. | 28 |
| Figura 12 – Diagrama T-S para um refrigerador real e ideal. | 28 |
| Figura 13 – Ciclo padrão de refrigeração. | 29 |
| Figura 14 – Diagrama funcional básico. | 31 |
| Figura 15 – Unidade condensadora e condensador | 33 |
| Figura 16 – Unidade evaporadora e sensor de controle de temperatura interna . . . | 33 |
| Figura 17 – Sensor de controle de temperatura de degelo e resistência de degelo . . | 34 |
| Figura 18 – Microcontrolador PIC18F2550. | 35 |
| Figura 19 – Sensor de temperatura LM35 | 35 |
| Figura 20 – Controle <i>on-off</i> com histerese | 36 |
| Figura 21 – <i>Initial Pull Down Time</i> | 38 |
| Figura 22 – Teste de consumo de energia | 38 |
| Figura 23 – Transição entre o Modo Econômico e o Modo Normal | 39 |
| Figura 24 – Fluxograma para o modo de operação Power-up | 39 |
| Figura 25 – Fluxograma para o modo de operação Controle | 40 |
| Figura 26 – Fluxograma para o modo de operação Degelo | 41 |
| Figura 27 – Ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do MikroC PRO | 42 |
| Figura 28 – HID Terminal do MikroC para comunicação serial | 43 |
| Figura 29 – Conexões nas portas do microcontrolador | 45 |
| Figura 30 – Uso da memória do PIC na etapa de gravação | 47 |
| Figura 31 – Operação incorreta no Modo <i>Power-Up</i> para temperatura interna . . . | 48 |
| Figura 32 – Indicação de falha no conjunto sensor-atuador para temperatura interna | 48 |
| Figura 33 – Operação incorreta no Modo <i>Power-Up</i> para temperatura de degelo . . | 49 |
| Figura 34 – Indicação de falha no conjunto sensor-atuador para temperatura de degelo | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 35 – Operação no Modo Controle | 50 |
| Figura 36 – Atuação <i>on-off</i> da lógica de controle proposta | 51 |
| Figura 37 – Operação completa do sistema de controle proposto | 51 |
| Figura 38 – Etapa de <i>Power-up</i> na operação completa do sistema de controle . . . | 52 |
| Figura 39 – Modo controle na operação completa do sistema de controle | 52 |
| Figura 40 – Modo degelo na operação completa do sistema de controle | 53 |
| Figura 41 – Resposta à primeira alteração dos parâmetros de controle via comu- cação serial USB | 54 |
| Figura 42 – HID Terminal do MikroC para alteração dos parâmetros para $SP =$ $3\text{ }^{\circ}C$ e $H = 1\text{ }^{\circ}C$ | 54 |
| Figura 43 – Resposta à segunda alteração dos parâmetros de controle via comu- cação serial USB | 55 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Especificação dos itens do projeto | 32 |
| Tabela 2 – Especificações do sensor de temperatura LM35 | 35 |
| Tabela 3 – Valores <i>default</i> para o esquema de controle | 40 |
| Tabela 4 – Indicação do estado de operação do código de controle por meio dos LED's | 41 |
| Tabela 5 – Interpretação do pacote de caracteres recebidos via comunicação serial USB | 43 |
| Tabela 6 – Conexão das portas de entrada, saída e comunicação serial do PIC . . | 44 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|---------|---|
| A | Atuador |
| ACSII | <i>American Standard Code for Information Interchange</i> |
| AD | Analógico/Digital |
| CI | Circuito integrado |
| DA | Digital/Analógico |
| DAQ | <i>Data Acquisition</i> |
| DIL | <i>Dual in Line</i> |
| EEPROM | <i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> |
| H | Histerese |
| IPDT | <i>Initial Pull Down Time</i> |
| IBM-PC | <i>Personal Computer</i> |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> |
| LabVIEW | <i>Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench</i> |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracker</i> |
| N | Número de ciclos para degelo |
| NTC | <i>Negative temperature coefficient</i> |
| PI | Proporcional integral |
| PIC | <i>Peripheral Interface Controller</i> |
| PID | Proporcional integral derivativo |
| PTC | <i>Positive temperature coefficient</i> |
| PV | <i>Process Variable</i> |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| SP | <i>Set-Point</i> |
| T | Temperatura |

| | |
|-----------|--|
| T_{deg} | Temperatura máxima de degelo |
| t_{deg} | Tempo máximo de degelo |
| USB | <i>Universal Serial Bus</i> |
| USUART | <i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> |
| VCC | <i>Variable Capacity Compressor</i> |

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 15 |
| 1.1 | Sistemas embarcados | 15 |
| 1.2 | Controle de processos | 16 |
| 1.2.1 | Controle analógico | 17 |
| 1.2.1.1 | Controlador PID | 18 |
| 1.2.1.2 | Controlador <i>on-off</i> | 19 |
| 1.2.2 | Controle digital | 20 |
| 1.2.3 | Instrumentação eletrônica | 22 |
| 1.3 | Aplicações: controle térmico | 26 |
| 1.3.1 | Sistemas de refrigeração | 27 |
| 1.3.2 | Controle de refrigeração | 29 |
| 1.4 | Objetivo | 30 |
| 1.5 | Estrutura do trabalho | 30 |
| 2 | Metodologia | 31 |
| 2.1 | Especificações do projeto: estrutura física | 32 |
| 2.1.1 | Microcontrolador | 32 |
| 2.1.2 | Sensor de temperatura | 35 |
| 2.2 | Projeto do código | 36 |
| 2.2.1 | Esquema de controle | 36 |
| 2.2.2 | Modos de operação | 36 |
| 2.2.3 | Especificação da operação das rotinas do código | 37 |
| 2.2.4 | Simulação no <i>software</i> Proteus e montagem | 42 |
| 2.2.4.1 | Comunicação serial USB para alteração do <i>firmware</i> | 43 |
| 2.2.4.2 | Especificação das conexões do sistema de controle nas portas do microcontrolador | 44 |
| 2.3 | Estudo de casos | 45 |
| 3 | Resultados e discussões | 47 |
| 3.1 | Estudo de caso 1: Falha no conjunto sensor-atuador no Modo <i>Power-Up</i> para temperatura interna | 47 |
| 3.2 | Estudo de caso 2: Falha no conjunto sensor-atuador no Modo <i>Power-Up</i> para temperatura de degelo | 49 |
| 3.3 | Estudo de caso 3: Operação da lógica <i>on-off</i> no Modo Controle | 49 |
| 3.4 | Estudo de caso 4: Operação completa do sistema de controle | 50 |
| 3.5 | Estudo de caso 5: Comunicação em tempo real via USB com o usuário para alteração dos parâmetros de controle | 53 |
| 4 | Considerações finais | 56 |

Referências 58

1 Introdução

A constante evolução no estilo de vida da população tem requisitado uma gradual complexidade dos mecanismos de produção pelas empresas, em virtude do aumento das exigências dos consumidores, bem como da busca por processos produtivos mais eficazes e, por consequência, economicamente mais viáveis. Nesse aspecto, os sistemas de controle surgem como um mecanismo presente nos processos permitindo melhorias na cadeia produtiva, redução de custos, maior qualificação dos produtos, além de serem empregados diversas vezes como parte constituinte do produto final (BRETAS, 2019).

A utilização e incorporação destes sistemas nos processos tem proporcionado uma elevada taxa de crescimento da indústria eletrônica por meio da grande aplicabilidade destes sistemas eletrônicos em produtos comuns na sociedade como automóveis, eletrodomésticos, dentre outros. Uma enorme quantidade de sistemas computacionais são produzidos e "embutidos" nestes equipamentos para execução de tarefas específicas integrantes de um processo amplo e completo (BARROS; CAVALCANTE, 2003).

A integração dos sistemas eletrônicos nos processos produtivos contribui para a obtenção de maior produtividade e qualidade do produto final. Ao mesmo passo, aumentou-se a complexibilidade de desenvolvimento e produção, uma vez que são utilizados cada vez mais uma maior quantidade de componentes e de natureza distinta (BARROS; CAVALCANTE, 2003). Dentre as classes básicas de sistemas digitais pode-se destacar os sistemas embarcados. O avanço tecnológico tem contribuído com o desenvolvimento de sistemas embarcados cada vez com mais tecnologia e eficiência (REIS, 2004). Neste trabalho, a temática será em torno do uso de sistemas embarcados em processos de controle térmico.

1.1 Sistemas embarcados

Um sistema embarcado (do inglês, *Embeeded System*) é um sistema computacional completo e independente com a função de executar alguma tarefa específica. Em outras palavras, os sistemas embarcados podem ser definidos como sendo uma combinação de *hardware* e *software*, bem como mecânicas adicionais ou peças, projetados para executar uma função dedicada (SANTOS; MORENO, 2019).

A diferença que surge entre os computadores pessoais e os sistemas embarcados é que, depois de ser desenvolvido um computador pessoal, este pode ser reprogramado quantas vezes se fizer necessário, enquanto os sistemas embarcados são desenvolvidos para funções pré-definidas e, geralmente, de uso limitado, o que permite o desenvolvimento de circuitos menores, otimizando recursos computacionais e o custo do produto (SILVA; ARAUJO; CAVALCANTE, 2019).

Uma flexibilidade permitida nos sistemas embarcados é o caso de *upgrade* de novas versões, permitindo reprogramar o sistemas com novas versões e funções, o que necessita de um "cérebro" que gerencie o funcionamento do sistema, sendo os microcontroladores amplamente utilizados com esta função (CHASE; ALMEIDA, 2007). Assim, a programação de instruções é feita por meio de uma codificação chamada *firmware*, na qual são definidas as funcionalidades do dispositivo. Um cuidado maior é tomado no desenvolvimento de *softwares* para sistemas embarcados. Isso se deve ao fato de que é esperado que esses dispositivos trabalhem sem erros ininterruptamente pois, uma vez gravado o *firmware*, a sua atualização é inviável ou até mesmo impossível para o usuário (SILVA; ARAUJO; CAVALCANTE, 2019).

Em diversas situações, os sistemas embarcados possuem pouca ou nenhuma interação com o usuário. Eles apenas executam a tarefa para a qual foram previamente programados assim que são ligados. Alguns permitem uma pequena participação a partir de botões ou visores que exibem informações do processo e ajuste de funcionalidades. Todavia, com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento dos microcontroladores com memória eletricamente programável (EEPROM) surgiu também a possibilidade de reprogramação do microcontrolador com a finalidade de uso em outros projetos ou atualização de *firmware* (SILVA; ARAUJO; CAVALCANTE, 2019).

Um estudo de caso da programação de sistemas embarcados usando microcontroladores é apresentado em (MIRITZ, 2016). O desenvolvimento do projeto englobou as etapas de programação e gravação do microcontrolador, desenho do esquema eletrônico, da placa de circuito impresso e do ambiente de controle USB. Para validação, utilizou-se um sistema de controle da temperatura ambiente. A gravação do programa foi realizada no *software* MikroC e a simulação feita no *software* Isis. Define-se um valor limite para a temperatura, sendo este gravado na EEPROM via comunicação USB. A cada 0,5 s é realizada uma leitura pelo microcontrolador que ativa uma porta de saída indicando que a temperatura está acima do limite permitido. Em termos práticos, esta saída representa o atuador do processo.

1.2 Controle de processos

Os sistemas de controle possuem diversas funções, dentre elas a capacidade de rastreamento de referência, fazendo com que as variáveis do processo acompanhem a referência desejada. Entre as variáveis de controle pode-se destacar: pressão, temperatura, fluxo, velocidade, entre outras (NISE, 2011).

O adequado desenvolvimento do sistema de controle pode evitar paradas inesperadas no sistema, evitar acidentes e diminuir o tempo de *start-up* (tempo necessário para a planta operar após uma parada) do processo. Portanto, justifica-se o estudo destes sis-

temas, uma vez que o desenvolvimento de sistemas de controle automático de falhas traz ganhos econômicos, sociais e ambientais (JESUS et al., 2001).

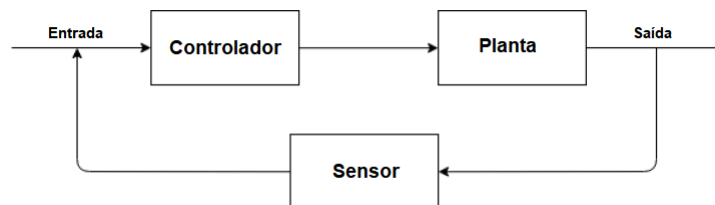
Para um sistema de controle existem duas malhas principais a se analisar. A primeira delas é o controle em malha aberta, que possui a característica distintiva de não gerar compensação a perturbações externas que estejam sendo somadas ao sinal controle no atuador (DORF; BISHOP, 2009). Assim, o comando é feito simplesmente pela entrada, como mostra a Figura 1. A sensibilidade a perturbações e a falta de precisão para corrigi-las são algumas das desvantagens desses sistemas. A segunda malha de controle, representada na Figura 2, surge para contorná-las por meio da realimentação, constituindo o controle em malha fechada (NISE, 2011).

Figura 1 – Diagrama de um sistema de controle em malha aberta.



Fonte: Adaptada de Duarte (2019).

Figura 2 – Diagrama de um sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Adaptada de Duarte (2019).

Algumas vantagens dos sistemas de controle em malha fechada em relação ao controle manual, como a amplificação de potência, seguimento de referência e compensação de perturbações contribuem para que os sistemas de controle sejam amplamente difundidos (DUARTE, 2019).

1.2.1 Controle analógico

Com o advento do uso de sistemas de controle em processos, os circuitos analógicos foram os primeiros a serem empregados. O funcionamento se dava por meio de amplificadores operacionais, através dos quais calculava-se a forma correta de atuar no sistema controlado. Assim, estabeleceu-se uma técnica de baixo custo de implementação que se mostrou eficiente em diversas situações (TAJIRI, 2009). Técnicas de projeto como lugar das raízes, resposta em frequência, controle *on-off* e controlador PID tiveram início com os desenvolvimentos analógicos.

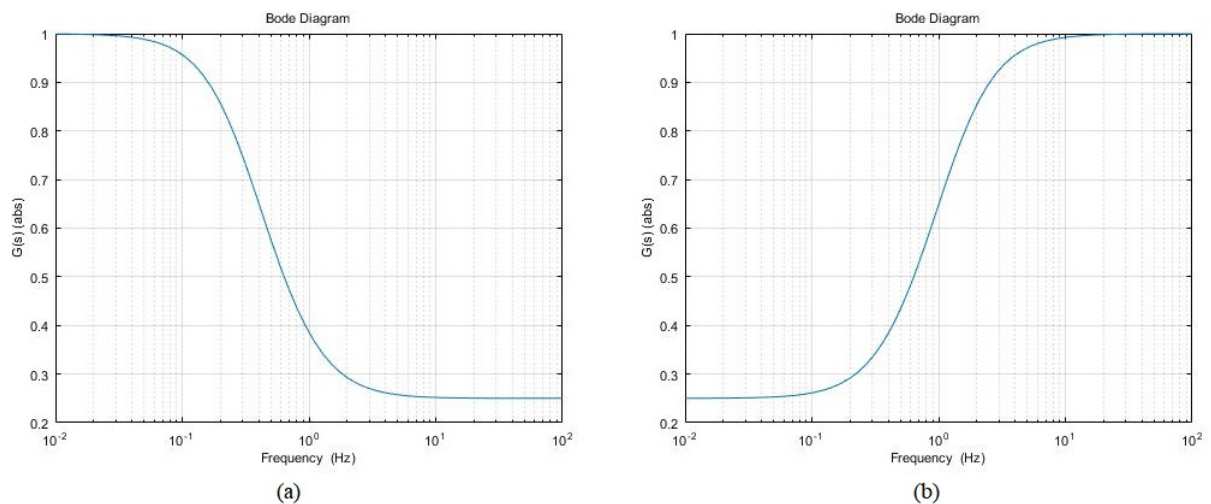
Define-se um controlador analógico como um circuito composto por elementos elétricos modelado e construído para representação física de uma função de transferência

desejada (NISE, 2011). Em outras palavras, trata-se de um filtro que possui uma relação entre o módulo do sinal de entrada e o módulo do sinal de saída dependente da frequência.

Pode-se, também, definir um filtro como sendo um quadripolo com capacidade de atenuação de determinadas frequências do espectro de sinal de entrada, sendo classificados em ativos e passivos. Os filtros passivos são formados por componentes elétricos como resistores, indutores e capacitores, que não necessitam de alimentação externa. Por outro lado, os filtros ativos possuem elementos que precisam de polarização externa para funcionamento, como transistores e amplificadores operacionais (PIZZIOLO, 2018).

Tais filtros podem ser do tipo passa-baixa (rejeitam componentes de alta frequência), passa-alta (rejeitam componente de baixa frequência) ou passa-faixa (permite a passagem de sinal em uma determinada faixa de frequência), servindo como base para o projeto dos controladores avanço de fase e atraso de fase, cujos diagramas de Bode encontram-se a seguir, bem como os controladores PID (OGATA, 2005; NISE, 2012).

Figura 3 – Diagrama de Bode para um controlador (a) atraso de fase e (b) avanço de fase.



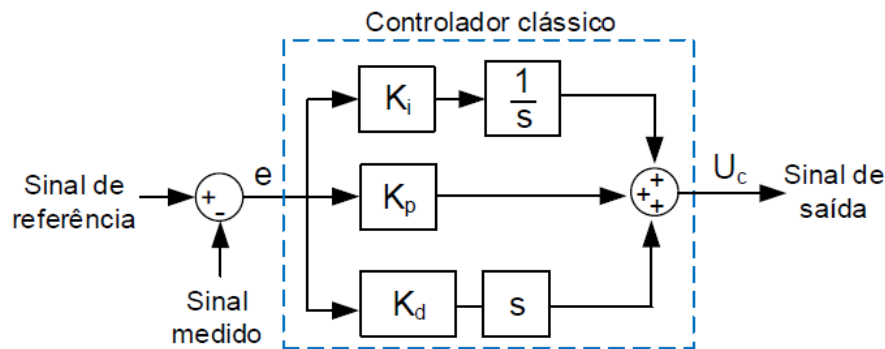
Fonte: Gerada pelo *software* MATLAB

1.2.1.1 Controlador PID

O sinal de erro pode ser obtido pela diferença entre um sinal de referência e a atual saída do processo, permitindo a tomada de decisões para obter-se o sinal de entrada necessário a cada instante. Assim, o processamento do erro é crucial (AFUSO, 2011). A topologia do controlador PID tem por característica a ação de controle deste erro em três parcelas: proporcional, integral e derivativo, conforme mostra a Figura 4 (AGNOLETTO, 2015). Para cada parcela existe um ganho associado. esse tipo de controlador é amplamente utilizado devido a sua fácil construção e sintonia (NISE, 2011).

Souza et al. (2019) desenvolve uma técnica de controle para refrigeradores composto por uma troca dinâmica de referência para um controlador PI, juntamente com

Figura 4 – Estrutura de um controlador clássico PID.



Fonte: Agnoletto (2015).

um conjunto de suposições empíricas. O trabalho desenvolveu uma estratégia de controle de temperatura utilizando a corrente do compressor como variável de processo em substituição à temperatura. Diversos valores de *set-points* de temperatura foram testados, bem como mudanças na temperatura ambiente externa. Em todas as situações a estratégia de controle regulou a temperatura para valores muito próximos aos desejados. Com isso, conclui-se a possibilidade de substituição do sensor de temperatura pelo sensor de corrente como uma estratégia de menor custo de produção e manutenção.

O estudo da sintonia de controladores PID para temperatura é realizado em Cera-Martínez, Ortiz-Sandoval e Gualdrón-Guerrero (2018). Utilizando como módulo didático um recipiente com água, um resistor de aquecimento controlado por uma tensão CC como atuador e um termopar como sensor de temperatura, o trabalho desenvolve técnicas de redes neurais para sintonia do PID. Os resultados são comparados com as metodologias convencionais de sintonia presentes no PID Tuner do *software* MATLAB. Os resultados indicam que as técnicas propostas são adequadas para a sintonia. Todavia, estas técnicas possuem um nível maior de complexidade.

A sintonia do controlador PID se mostra uma etapa crucial no desenvolvimento desta metodologia de controle. Apesar das diversas técnicas existentes atualmente, a utilização da lógica de controle *on-off* se mostra de alta simplicidade, uma vez que não há definição de parâmetros de ganhos, como será discutido a seguir. Além disso, a estratégia PID requer a ação de filtragem na parcela derivativa do erro, o que torna o processo mais complexo e caro.

1.2.1.2 Controlador *on-off*

O controlador *on-off* é um dos que apresenta maior simplicidade de operação. Dado o sinal de entrada, este valor é comparado com valores superiores e inferiores de referência. Caso o sinal de entrada seja maior que a referência superior, o atuador é desligado. Caso o sinal de entrada seja menor que a referência inferior, o atuador é acionado (NISE, 2011; DUARTE, 2019). Trata-se de um controle relativamente simples e barato, sendo

assim amplamente utilizado em sistemas de controle industriais e domésticos (OGATA, 2005). Contudo, a utilização deste controlador impossibilita a estabilização da variável de controle (PETRUZELLA, 2014).

Para conseguir um sistema de controle de temperatura eficaz, uma série de estratégias se encontram propostas na literatura. Winck et al. (2018) realiza uma análise de potenciais ganhos em desempenho energético de estratégias de controle PI e *on-off* de um refrigerador. Observou-se o comportamento energético do sistema operando em regime cíclico para diferentes rotações e condições ambiente controladas em câmara, implementando em LabVIEW duas estratégias de controle de estrutura variável baseadas no princípio liga-desliga do compressor VCC e utilizando a leitura da temperatura interna do refrigerador.

Evelin (2011) desenvolve estratégias de controle de temperatura para um sistema de refrigeração doméstico utilizando lógica de controle *on-off* para ligar e desligar aparelhos de ar condicionado e umidificadores por meio de relés. A estratégia *on-off* atendeu às exigências de controle se mostrando de fácil implementação. A estratégia *on-off* também é utilizada por Leite, Draszewski e Abaide (2019) para controle de temperatura de um recipiente com água mediante plataforma Arduino. Uma resistência elétrica acionada por um relé exerce o papel de atuador, utilizando um termostato como sensor de temperatura. A estratégia se mostrou de simples aplicação e baixo custo.

Pode-se notar a grande facilidade em se utilizar a estratégia de controle *on-off* para temperatura. A natureza dos atuadores como os relés se enquadram perfeitamente à esta lógica de controle, mostrando-se extremamente úteis no processo de controle *on-off* de temperatura. Além disso, o desenvolvimento desta lógica em sistemas embarcados não requer uma lógica de programação complexa, bem como a implementação prática é simples em comparação às estratégias PID.

1.2.2 Controle digital

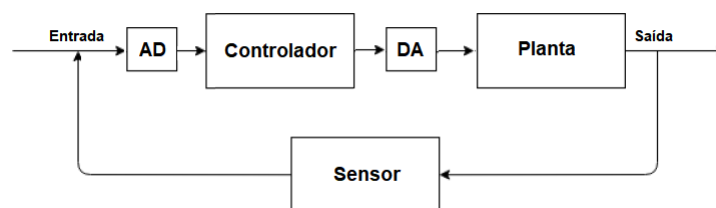
O desenvolvimento do minicomputador e microcomputador em 1960 e 1970, respectivamente, permitiu um grande avanço nas técnicas de controle de sistemas físicos, exercendo tarefas como supervisão externa à malha de realimentação e o controle propriamente dito na malha interna. Substituiu-se então, os componentes analógicos que exercem o papel físicos de filtros (funções de transferência) por computadores digitais para execução de cálculos para emular tal comportamento físico (NISE, 2012).

São muitas as vantagens da utilização de controladores digitais nas malhas de controle em comparação aos controladores analógicos como redução do custo, flexibilidade de projeto e alteração de parâmetros, imunidade a ruídos, entre outras. Um único controlador digital pode substituir vários controladores analógicos, fator interessante em sistemas de controle multivariáveis (NISE, 2012; OGATA, 2005). Um ponto interessante é que mudanças nos parâmetros de controle podem ser realizadas com simples alterações

nos códigos computacionais ao invés da alteração de elementos físicos, como no caso dos controladores analógicos.

A malha de controle com utilização de um controlador digital é exibida na Figura 5. Os sinais reais (analógicos) são medidos por sensores e o erro é processado sendo, posteriormente, convertido em um sinal digital para o controlador por meio de um conversor analógico-digital (AD). Este sinal digital é processado pelo controlador e sua saída é então convertida para um sinal analógico por meio do conversor digital-analógico (DA) para aplicação na planta (NISE, 2012).

Figura 5 – Diagrama de um sistema de controle digital em malha fechada.



Fonte: Adaptada de Duarte (2019).

A conversão digital-analógico é uma tarefa simples e instantânea. Chaves eletrônicas podem ser acionadas por um código binário representativo de um certo nível de tensão produzindo exatamente este nível analógico de saída. Todavia, a conversão analógico-digital é uma tarefa realizada em dois passos: amostragem do sinal contínuo e conversão em dados binários (NISE, 2012). Um importante ponto a ser discutido é a taxa de amostragem a ser utilizada, que deve ser pelo menos o dobro da faixa de passagem do sinal, respeitando o Teorema da amostragem (OPPENHEIM, 2010; NISE, 2011).

O projeto de um controlador digital pode ser feito com base no controlador analógico desenvolvido, seja ele um controlador *on-off*, PID, dentre outros. Um dos métodos mais utilizados é a discretização do controlador analógico buscando obter desempenho semelhante (DUAN; JIN, 1999). Para tal, utiliza-se a Transformada Z para discretização da função de transferência do controlador com uma taxa de amostragem definida, transformando-a em uma equação de diferenças que é, então, processada pelo computador digital.

O controle digital de temperatura é abordado por Tonelli (2009) trazendo a criação de um protótipo dividido em três módulos fisicamente ligados entre si através do protocolo RS-485 com microprocessadores da família ATMEGA de 8 bits programados em linguagem C. Além disso, Bernuy e Filho (2009) realiza o controle de temperatura usando o microcontrolador PIC 16F877. Sendo o objeto de estudo uma caldeira industrial, os atuadores utilizados são as válvulas *on-off* que controlam a entrada de vapor no sistema através de relés conectados diretamente no PIC. Também foram adicionados ao sistema alarmes que atuaram quando a temperatura for maior ou menor nas tolerâncias mínimas permitidas.

Pereira e Gonçalves (2014) e Santos et al. (2012) desenvolveram uma interface eletrônica para controle *on-off* do aquecimento e temperatura da água. Um microcontrolador PIC foi utilizado para atuar como unidade central de processamento, sendo todos os componentes presentes no sistema controlados por este a partir de um programa previamente gravado em sua memória.

1.2.3 Instrumentação eletrônica

Uma importante etapa no desenvolvimento e projeto dos sistemas de controle é a instrumentação eletrônica, que define os equipamentos instrumentais que serão aplicados no projeto, bem como a configuração do *hardware* em função dos sensores que serão utilizados, a precisão e exatidão das medições, limitações de medições, dentre outros. A instrumentação eletrônica é o conjunto de técnicas, recursos e métodos envolvidos no desenvolvimento de dispositivos que buscam aumentar a eficácia de mecanismos de percepção e comunicação do homem (ARAGONÉS et al., 2003). Nos projetos de sistemas de controle, o foco é dividido entre tratamento de sinais de entradas e quantidades, e no processamento de sinais de saída. Nestas etapas, a ênfase é dada nos sensores ou transdutores e nos atuadores, respectivamente.

Na eletrônica trabalha-se com dois tipos de sensores, os analógicos e os digitais. Esta classificação é dada em função do tipo de sinal processado por eles. Os sensores analógicos comunicam-se por meio de sinais analógicos que podem assumir quaisquer valores dentro de um intervalo. Logo, este valor deve ser convertido para um valor digital, função realizada pelo conversor AD (MARTINAZZO; ORLANDO; URI, 2016).

O que define a quantidade de valores representáveis por um conversor AD é a sua resolução, que pode ser calculada em função do seu número de *bits* (N) e da tensão de referência do conversor (V_{ref}) por meio da Equação 1.1. Quanto maior o número de bits do conversor, melhor será a sua resolução.

$$res = \frac{V_{ref}}{2^N - 1} \quad (1.1)$$

Os sensores digitais, por sua vez, possuem níveis de tensão definidos para comunicação, estritamente relacionados aos níveis lógicos alto ou baixo, que podem ser vistos como 0 ou 1. Os níveis de tensão para os estados lógicos variam conforme o sensor utilizado.

Em termos práticos, faz-se uso tanto de sensores analógicos quanto digitais (MARTINAZZO; ORLANDO; URI, 2016; LEE et al., 2007). Em virtude da natureza discreta dos sensores digitais, que operam com base nos níveis lógicos, estes são amplamente utilizados, por exemplo, para verificar ausência ou presença de um certo objeto, atividades de contagem e determinação de distância ou velocidade (LEE et al., 2007; WENDLING,

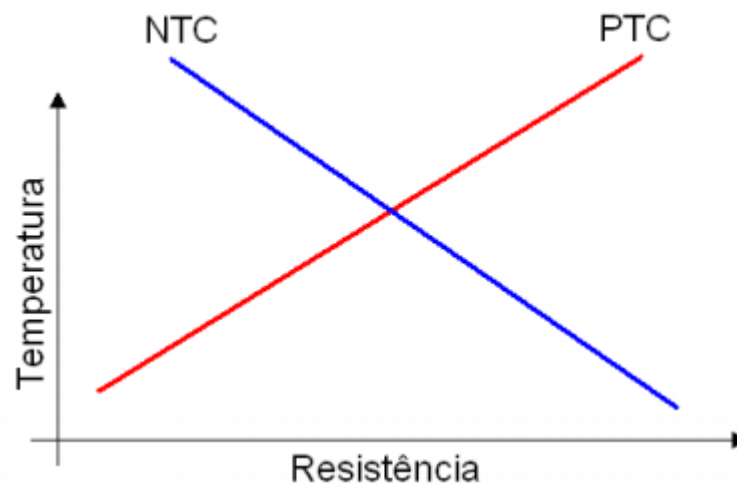
2010). Os sensores analógicos, por sua vez, fornecem maior quantidade de informações sobre uma variável. Sensores analógicos podem ter sua saída graduada entre 4 mA e 20 mA , por exemplo, em função da variável a ser medida.

Neste ponto, os sensores terão um amplo destaque e virtude de suas distintas características que são importantes na confecção dos sistemas de controle. Como o foco deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de controle térmico, os sensores de temperatura serão melhor discutidos.

A medição de temperatura por sensores pode-se ser feita através variação da resistência elétrica de um fio com o aumento da temperatura, que ocorre em virtude do aumento da concentração de portadores de carga (GRALIK; BIAVA, 2019; MARTINAZZO; ORLANDO; URI, 2016). Os sensores que fazem uso desta propriedade são conhecidos como termistores, ou resistores termicamente sensíveis. Existem duas classes de termistores: NTC (*negative temperature coefficient*), que apresentam diminuição da resistividade elétrica com o aumento da temperatura, e PTC (*positive temperature coefficient*), que apresentam aumento da resistividade elétrica com aumento da temperatura (GRALIK; BIAVA, 2019; JUNIOR, 2007).

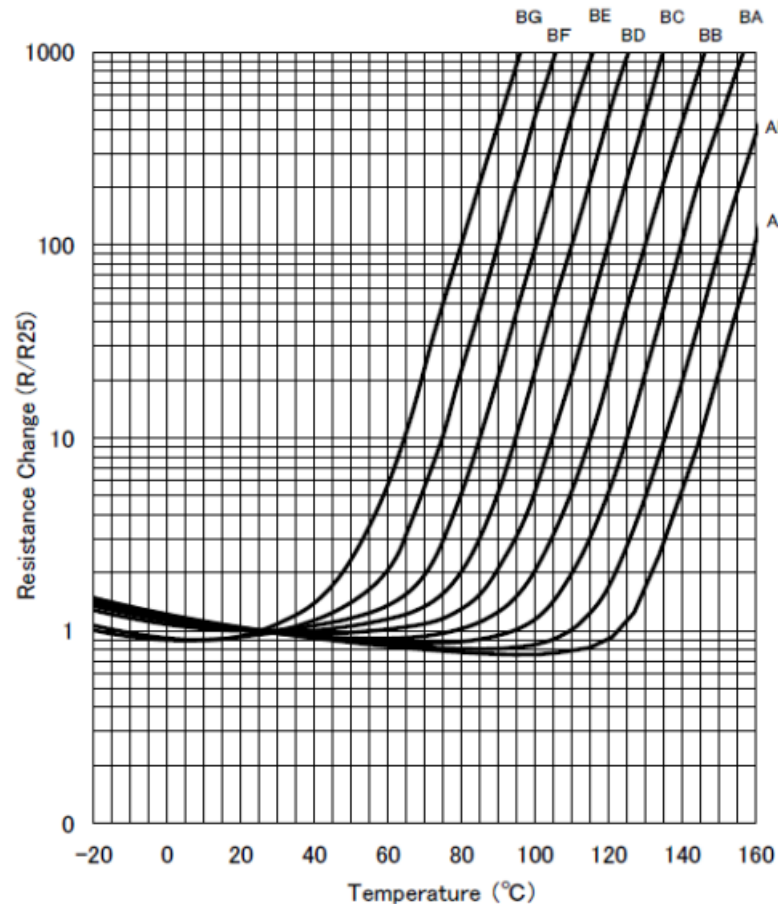
As curvas características dos termistores estão apresentadas na Figura 6. Deve-se notar que, apesar da representação linear da relação entre temperatura e resistência, esta relação apresenta desvios da linearidade para a grande maioria dos termistores reais. Alguns termistores lineares já são comercializados, como o TMP61 da Texas *Instruments*. Como exemplo, as curvas reais dos termistores PTC da muRata são exibidas na Figura 7. Em termos práticos, a aplicação dos termistores é simples, uma vez que circuitos comparadores de tensão podem ser acionados a partir de variações na resistência (WENDLING, 2010).

Figura 6 – Curvas características T vs R para os termistores PTC e NTC.



Fonte: Wendling (2010).

Os termopares, por sua vez, são sensores de temperatura que possuem como prin-

Figura 7 – Curvas reais para os termistores PTC da empresa *muRata Manufacturing*

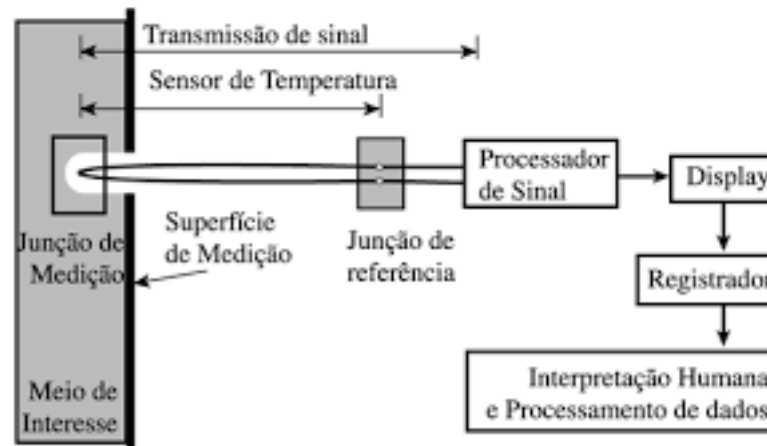
Fonte: muRata Manufacturing (2020).

cípio de funcionamento o Efeito *Seebeck*, que relaciona o surgimento de uma diferença de potencial em um material condutor em virtude de um gradiente de temperatura entre suas extremidades. O termopar é composto por uma junta de medição, onde ocorre a união dos terminais) e uma junta de referência. Caso esta última seja fixada em 0°C , a diferença de potencial que surge dependerá apenas da temperatura da junta de medição (SOUZA, 2013; MOREIRA, 2002). A Figura 8 mostra o esquema de medição de temperatura com utilização de termopar.

Outros sensores amplamente utilizados para medição de temperatura são os sensores de circuitos integrados, em virtude da facilidade de aplicação e simplicidade de integração com microcontroladores. Prates et al. (2011) implementam um sistema de controle de temperatura utilizando-se microcontrolador PIC16F877A. A temperatura foi medida pelo sensor LM35 e o seu controle foi realizado utilizando-se um TRIAC. Com um microcontrolador realizaram-se ações de controle PID, que determinavam a largura de pulso de um sinal PWM.

Os atuadores são dispositivos que convertem um sinal elétrico em uma ação do tipo mecânica (BRITO, 2014). Em sistemas de controle, o sinal elétrico recebido é proveniente

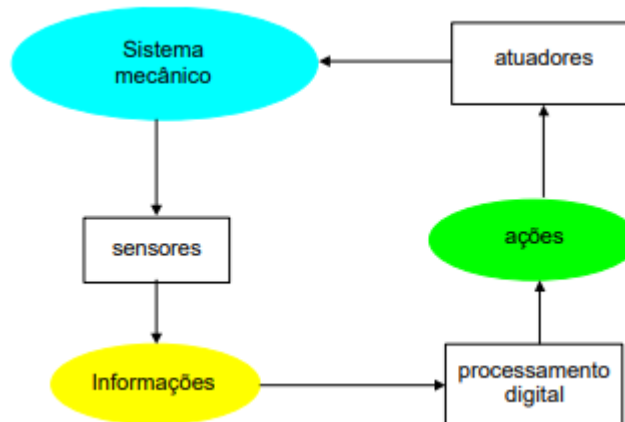
Figura 8 – Modelo de medição de temperatura com termopar.



Fonte: Moreira (2002).

do controlador e atuam sobre o sistema por meio de válvulas, relés, motores, solenoides, entre outros (SINCLAIR, 2000; WENDLING, 2010). Assim, existe uma ligação íntima entre o elemento sensor, o sistema de controle e o elemento atuador em um processo, que pode ser analisado na Figura 9.

Figura 9 – Relação entre sensor e atuador no controle de um processo.

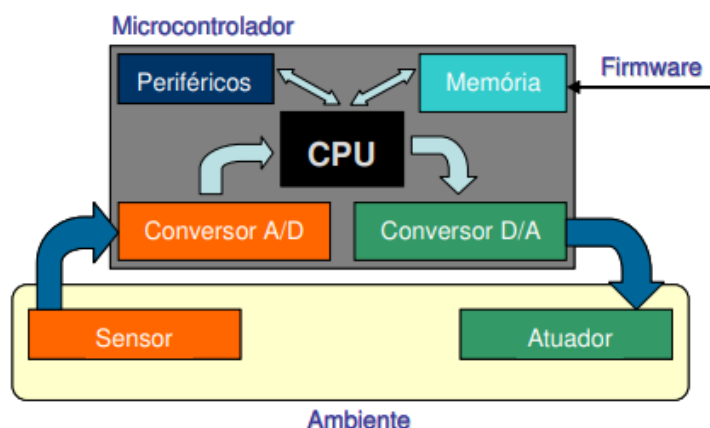


Fonte: Adaptada de Adamowski, Furukawa e Cozman (2001).

Ainda na parte de instrumentação eletrônica encontra-se a escolha e definição do microcontrolador, dispositivos amplamente utilizados e que foram viabilizados com o surgimento de circuitos integrados. Isso possibilitou a redução do tamanho dos equipamentos eletrônicos com a capacidade de execução de tarefas em um único chip. Em um microcontrolador temos uma unidade de processamento, memórias de leitura, escrita de dados, armazenamento de *firmware*, conversores, dentre outros componentes (SILVA; ARAUJO; CAVALCANTE, 2019). Na Figura 10 temos a representação do diagrama básico de um sistema embarcado controlando uma variável ambiente como, por exemplo, a temperatura.

Em outras palavras, os microcontroladores são sistemas computacionais de pequenas dimensões que englobam, em um único chip, interfaces de entrada e saída (digi-

Figura 10 – Diagrama de um sistema embarcado com microcontrolador.



Fonte: Chase e Almeida (2007).

tais/analógicas), memória, interface de comunicação serial, temporizadores, conversores, dentre outros periféricos. A vantagem dos microcontroladores é que, além de possuir os periféricos integrados em um único chip, são responsáveis pela execução e armazenamento de programas escritos para ele (*firmware*), além de possuir a capacidade de incremento de periféricos (CHASE; ALMEIDA, 2007).

Diversos dispositivos eletrônicos digitais utilizam microcontroladores, principalmente em produtos e componentes eletrônicos, dentre os quais pode-se destacar os sistemas de controle. Os motivos para essa ampla difusão são os baixos custos, facilidade de programação, grande número de funcionalidades, entre outros (PEREIRA, 2020). Conforme abordado anteriormente, o surgimento das EEPROM's aumentou ainda mais o campo de aplicação dos microcontroladores uma vez que trouxe a possibilidade de reprogramá-los.

1.3 Aplicações: controle térmico

A temperatura é uma variável extrema importância na maioria dos processos, influenciando diretamente na qualidade do produto final, bem como no custo de fabricação, justificando o estudo e análise de sistemas de controle direcionados à ela (BRETAS, 2019). Um problema presente no controle de temperatura decorrem da dificuldade de análise e modelagem dos sistemas térmicos, devido à imprecisão e variação dos parâmetros resistência e capacitância térmica, além do alto nível de abstração da teoria de controle (OGATA, 2005; BRETAS, 2019), o que pode ser contornado na prática por meio de experimentos, estudos de modelos matemáticos e simulações computacionais (BRETAS, 2019).

Dentre as diversas aplicações, pode-se citar o controle de temperatura: na cadeia produtiva alimentícia, estritamente ligado ao processamento correto em processos de fermentação ou garantia da inocuidade de alimentos (ALMEIDA, 1998); no armazenamento

de frutas e vegetais, sendo a temperatura um dos fatores mais importantes para a degradação dos tecidos vegetais (LASSO et al., 2003); na operação de alto-fornos em siderúrgicas e mineradoras (SOUZA; SAMOHYL; MALAVÉ, 2004), entre outras diversas aplicações.

Nesse contexto, a implementação de um sistema embarcado de aquisição de dados (DAQ) para monitoramento e controle de temperatura e umidade por meio de placas de circuito impresso customizadas é apresentada em Oliveira e Thiesen (2018). O sistema possui duas saídas e dois atuadores controlados por relés. Utilizou-se um microcontrolador de 8-bits com comunicação via interface serial entre os periféricos. Uma interface em ferramenta computacional foi utilizada de modo que o usuário pudesse ajustar os parâmetros e registrar os dados no computador. Verificou-se que o projeto possuiu desempenho satisfatório em relação ao controle da temperatura, demonstrando ser uma opção viável de baixo custo.

1.3.1 Sistemas de refrigeração

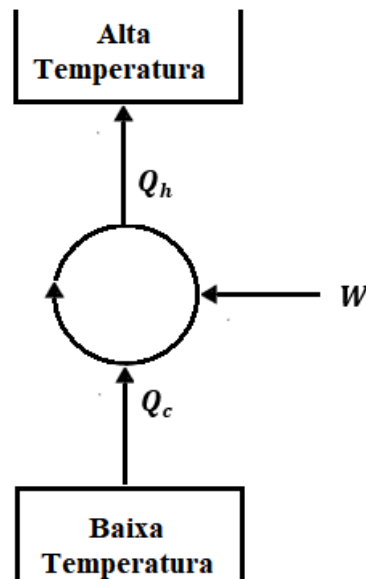
Os sistemas de refrigeração, sejam industriais ou residenciais, tornou-se algo comum o desenvolvimento das tecnologias. Atualmente, grande parte das residências e estabelecimentos possuem um refrigerador sendo, portanto, um produto essencial. Dessa forma, o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura de baixa potência, como *freezers* ou geladeiras, torna-se necessário, buscando alcançar as vantagens citadas anteriormente (SOUZA et al., 2019).

Os refrigeradores são compostos por uma série de elementos interconectados, sendo um dispositivo capaz de retirar calor de uma fonte fria e enviá-lo para uma fonte quente mediante a realização de trabalho sobre o ciclo (SEARS et al., 2008). O principal elemento deste dispositivo é o compressor, responsável por realizar trabalho sobre o gás refrigerante para que ele circule por todo o sistema (HERMES et al., 2000). O princípio básico de operação de um refrigerador pode ser analisado através da Figura 11.

O calor Q_c é retirado da fonte fria a uma temperatura T_c e é enviado o calor Q_h para a fonte quente a uma temperatura T_h . Para tal, o sistema deve receber o trabalho W . A segunda lei da termodinâmica afirma que nenhum processo pode envolver a retirada de calor de uma fonte fria para uma fonte quente sem adição de trabalho externo no ciclo (SEARS et al., 2008). Além disso, o ciclo de refrigeração é dito ideal se todos os processos forem reversíveis, caracterizando o Ciclo de Carnot, que possui o maior rendimento possível (SEARS et al., 2008; HERMES et al., 2000).

O ciclo de Carnot é composto por quatro processos termodinâmicos reversíveis: dois envolvendo troca de calor e dois envolvendo processos adiabáticos (isentrópicos) (SEARS et al., 2008). Todavia, trocas de calor com diferença finita de temperatura entre elementos de um refrigerador e perdas viscosas tornam a operação do ciclo não ideal (HERMES et al., 2006). Os ciclos real e ideal podem ser analisados no diagrama T-S exibido na Figura

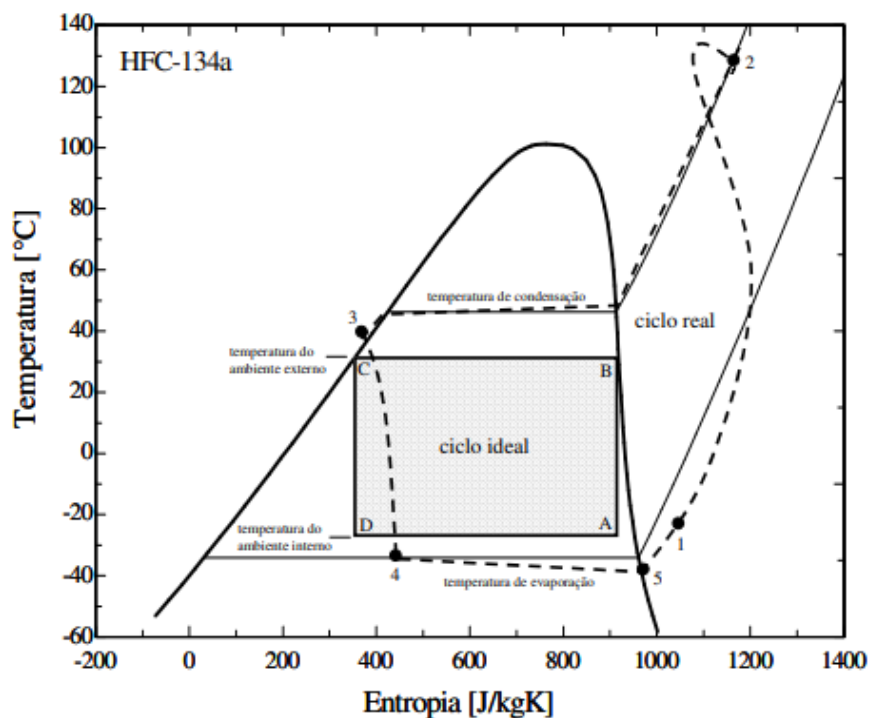
Figura 11 – Princípio de operação termodinâmico de um refrigerador.



Fonte: Adaptada de Hermes et al. (2000).

12. O ciclo ideal é representado pelos processos que ligam os estados termodinâmicos ABCD, enquanto o ciclo real é representado pelos processos que ligam os estados 12345 (HERMES et al., 2006).

Figura 12 – Diagrama T-S para um refrigerador real e ideal.

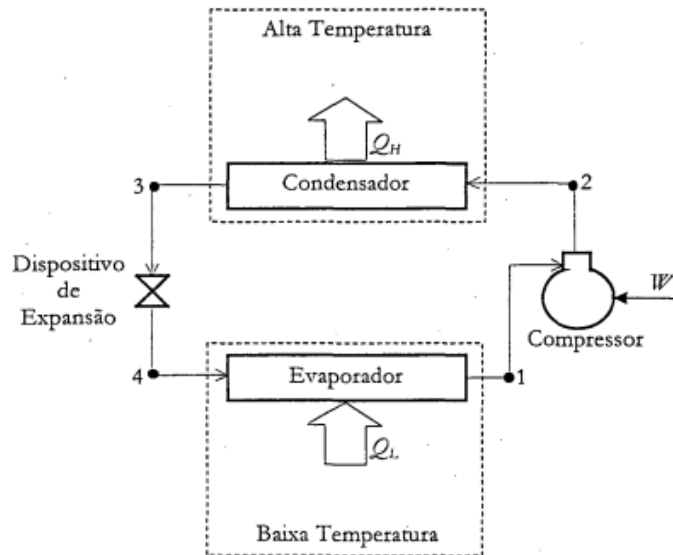


Fonte: Hermes et al. (2006).

O ciclo real de refrigeração contém uma série de irreversibilidades, como discutido acima. Ele é composto por dois trocadores de calor (condensador e evaporador), um

dispositivo de compressor e um de expansão. A circulação do fluido refrigerante permite que ocorra as trocas de calor. Os componentes deste ciclo podem ser analisados na Figura 13.

Figura 13 – Ciclo padrão de refrigeração.



Fonte: Hermes et al. (2000).

1.3.2 Controle de refrigeração

Os compressores de velocidade variável ajustam a velocidade de rotação conforme a demanda por meio do inversor de frequência, o que permite a otimização da capacidade de refrigeração de acordo com a necessidade do refrigerador, reduzindo o consumo de energia (EMBRACO, 2019). Por meio da variação da rotação do compressor pode-se controlar a capacidade de refrigeração do sistema, pois a capacidade de refrigeração ajusta-se à carga térmica. Por exemplo, para situação de baixa carga térmica, o compressor pode reduzir a rotação e, portanto, a capacidade de refrigeração, minimizando a frequência (LAGO et al., 2016).

Contudo, os compressores utilizados em refrigeração ainda possuem a limitação de operação no modo *on-off*, uma vez que apenas uma pequena parcela deles tem capacidade de operar com velocidade variável. Por exemplo, analisando o catálogo AM 2020 da Linha de Compressores Embraco - distribuição e revenda, são destacadas seis famílias de compressores de velocidade fixa com mais de 100 modelos e apenas duas famílias de compressores de velocidade variável, dentro da qual são apresentados 12 modelos (EMBRACO, 2020).

Outro fator que merece atenção é que o gerenciamento de óleo do compressor de velocidade variável é mais complexo em relação à tecnologia tradicional, uma vez que a velocidade é constantemente alterada para se adaptar à carga. Portanto, tem-se

uma restrição ao uso de compressores de velocidade variável, uma vez que o domínio do gerenciamento de óleo é essencial, o que pode tornar a tecnologia mais cara (DANFOSS, 2019). Por esses motivos, o controle *on-off* ainda é amplamente empregado nesses sistemas.

As empresas que desenvolvem os sistemas de refrigeração e o sistema de controle de temperatura, em quase sua totalidade, trabalham com controladores já parametrizados. Isto é, o *firmware* é pré definido e sem possibilidade de alteração. Isso requer contato com o desenvolvedor do código quando há necessidade de alteração de parâmetros ou de lógica, o que demanda gasto financeiro e tempo.

Na busca por independência tecnológica interna das empresas, existe uma exigência maior do mercado quanto à internalização dos processos produtivos. Atualmente, é comum que montadoras de refrigeradores comprem a aplicação prática para o controle de empresas especializadas, o que muitas vezes também aumenta os custos do produto, sendo interessante o desenvolvimento estas estratégias de forma interna.

1.4 Objetivo

Mediante os aspectos apresentados, esta monografia propõe um método que possibilite a atualização da placa pelo próprio usuário por meio de uma interface simples, tornando o processo de gravação mais rápido e com menor custo.

O objetivo geral desse trabalho foi desenvolver um software embarcado para controle da temperatura com a possibilidade de atualização dos parâmetros de controle sem a necessidade prévia de regravação do *firmware*. Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Desenvolver um algoritmo para o controle On/Off da temperatura ambiente aplicada em sistemas de refrigeração;
- Desenvolver uma estratégia de programação para atualização dos parâmetros de controle via comunicação USB;
- Simular o comportamento do sistema térmico exemplificado mediante às alterações de parâmetros de controle.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado na forma de capítulos, como descrito a seguir. O Capítulo 2 apresenta a metodologia de controle desenvolvida partindo das especificações da estrutura física ao desenvolvimento do código. Os resultados obtidos e discussões acerca destes são apresentados no Capítulo 3. Por fim, a conclusão do trabalho e propostas para trabalhos futuros estão contidas no Capítulo 4.

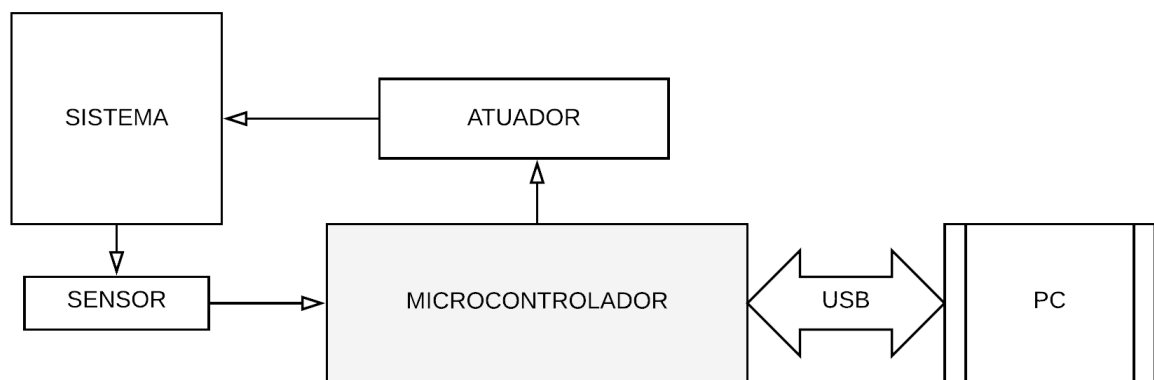
2 Metodologia

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos que foram utilizados neste trabalho. Na sequência serão apresentados os componentes utilizados para montagem experimental e para coleta de dados, bem como o desenvolvimento do algoritmo de controle e sua estrutura também serão abordados.

Um sistema de aquisição de dados, também conhecido como sistema DAQ (do inglês, *Data Acquisition*), é constituído por uma série de blocos de *hardware* com ampla variedade de funções, sendo seu desempenho dependente das características destes blocos (OLIVEIRA; THIESEN, 2018; PARK; PARK; MACKAY, 2003). Quando existe a implementação de uma metodologia de controle nesses sistemas, são acrescentados ao *hardware* dispositivos de processamento e atuadores para o controle. Entre esses dispositivos temos conversores (A/D ou D/A), microcontroladores, CI's de interfaces, entre outros (OLIVEIRA; THIESEN, 2018).

O sistema proposto permite o controle de temperatura por meio de *hardware* customizado e uma interface homem-máquina, possibilitando a alteração de parâmetros de controle sem necessidade de regravação de *firmware*. O diagrama funcional básico do sistema é exibido na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama funcional básico.



Fonte: Adaptada de Oliveira e Thiesen (2018).

O projeto de um sistema de controle térmico pode ser dividido em três etapas. A primeira é o projeto básico, o qual é composto pela análise do processo, modelagem do sistema e escolha da metodologia de controle. Na segunda etapa são realizadas a instalação e configuração dos dispositivos, buscando falhas nos *hardwares* e nos *softwares*. Por fim, a terceira etapa trata-se da operação e manutenção, etapa na qual são realizados os ajustes finos e harmonização dos controladores (BRETAS, 2019; TEIXEIRA et al., 2010).

2.1 Especificações do projeto: estrutura física

Nesse capítulo serão abordados os materiais utilizados na confecção e montagem do sistema de controle de temperatura em estudo, com ênfase nas especificações técnicas do microcontrolador, do sensor de temperatura, atuador, entre outros componentes. No projeto, busca-se o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura por meio do controle de um compressor (atuador) com esquema *on-off* de funcionamento. Os parâmetros de controle da lógica desenvolvida são a temperatura interior do sistema de refrigeração, temperatura do evaporador, tempo de degelo e número de ciclos de degelo, como será detalhado nos próximos tópicos. Um *firmware* foi desenvolvido com a possibilidade de modificar os parâmetros de controle. Na Tabela 1 encontra-se a especificação de todos itens do projeto.

Tabela 1 – Especificação dos itens do projeto

| Item | Quantidade | Especificação |
|----------------------------|------------|--|
| Sensor de temperatura LM35 | 2 | 1 sensor para medição de temperatura interna e outro para medição da temperatura do evaporador |
| Motor | 1 | Atuador do processo, ligando e desligando o compressor |
| Resistência | 1 | Resistência de degelo |
| LED | 2 | 1 LED azul e 1 LED vermelho |
| Microcontrolador | 1 | Microcontrolador PIC18F2550 de 8 bits com comunicação USB |

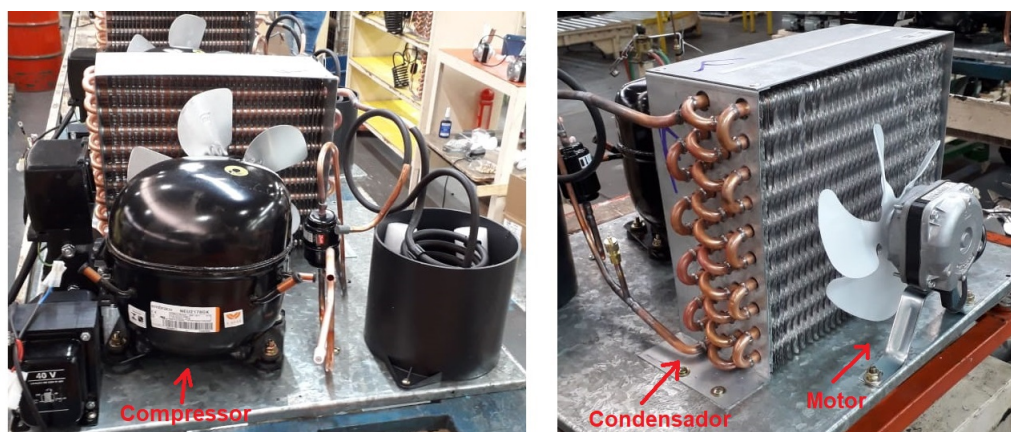
Na Figura 15 tem-se a representação da unidade condensadora e do condensador utilizado no sistema de refrigeração. Nas próximas partes do texto será comum referir-se ao condensador apenas como motor. Pode-se notar a presença de um motor com uma ventuinha, cujo objetivo é apenas dissipar calor do condensador. A unidade evaporadora e o sensor de controle de temperatura interna estão exibidos na Figura 16. Por fim, o sensor de controle de temperatura de degelo e a resistência de degelo estão exibidos na Figura 17.

2.1.1 Microcontrolador

No projeto foi utilizado o microcontrolador PIC18F2550, um microcontrolador integrado de 8 bits da MICROCHIP, sendo constituído por um microprocessador, memória de dados e programa, conversor A/D (análogo/digital), periféricos como portas de entrada e saída, USART, USB, entre outros. O PIC18F2550 reúne em um único chip (SILVEIRA; KAKUNO, 2012; ÇINAR; AKARSLAN, 2012):

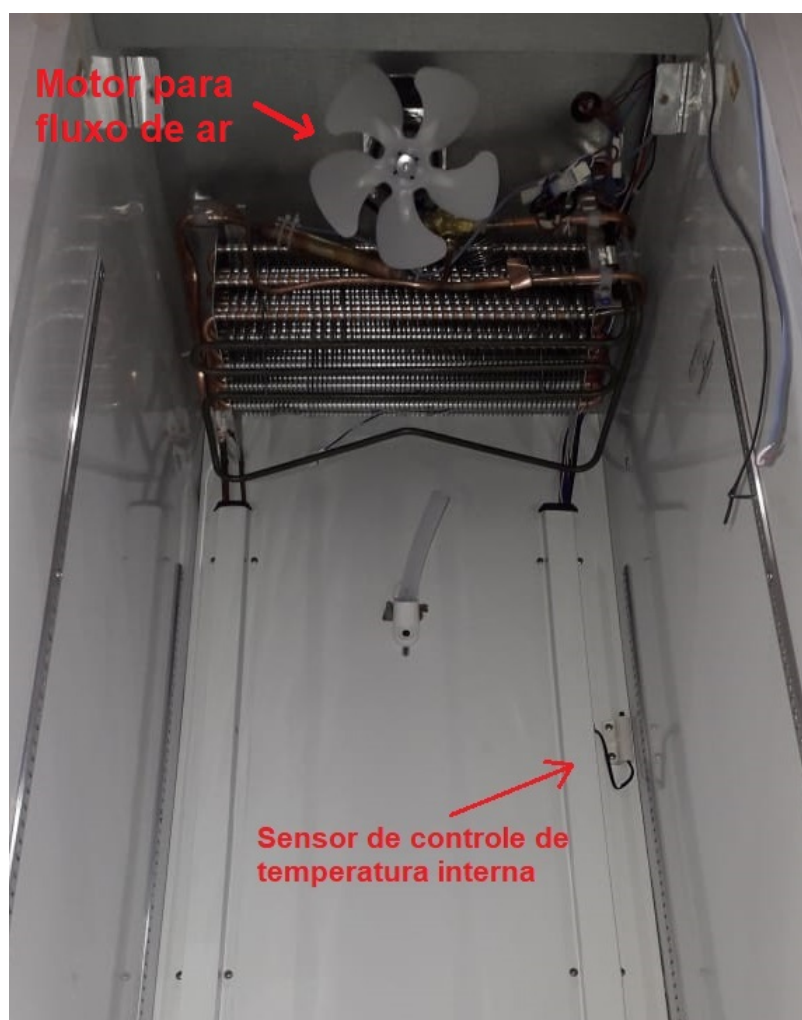
1. Encapsulamento DIL (dual in line) de 28 pinos, um invólucro padrão que permite fácil manipulação mecânica e permite fácil montagem elétrica;

Figura 15 – Unidade condensadora e condensador



Fonte: Foto tirada por Rafael Rodrigues (2020).

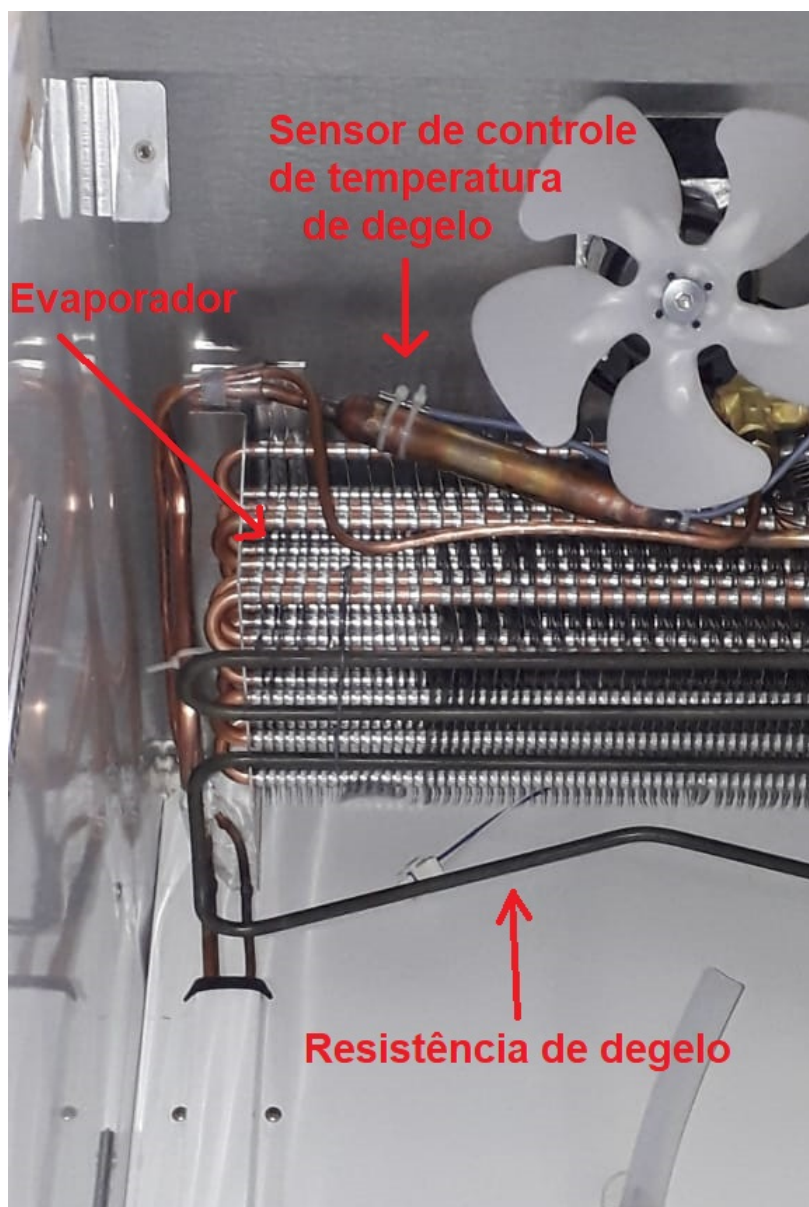
Figura 16 – Unidade evaporadora e sensor de controle de temperatura interna



Fonte: Foto tirada por Rafael Rodrigues (2020).

2. Possibilidade de entradas e saídas digitais, o que permite a conexão de sensores inteligentes, os quais fornecem sinais pré-processados e na forma digital;

Figura 17 – Sensor de controle de temperatura de degelo e resistência de degelo

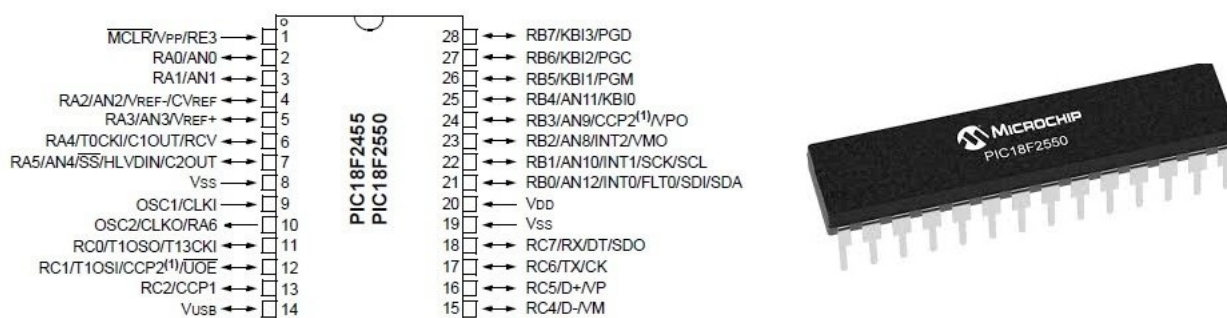


Fonte: Foto tirada por Rafael Martins (2020).

3. Saídas de pulso modulado (PWM), permitindo simular uma saída analógica para controle de cargas de forma linear;
4. Possibilidade de conexão a qualquer computador pessoal (portátil ou não) do tipo IBM-PC, utilizando a alimentação de 5 V presente na USB, o que elimina a necessidade de uma fonte de alimentação externa.

O microcontrolador e sua arquitetura são exibidos na Figura 18.

Figura 18 – Microcontrolador PIC18F2550.



Fonte: Adaptada de PIC Microcontroller (2012).

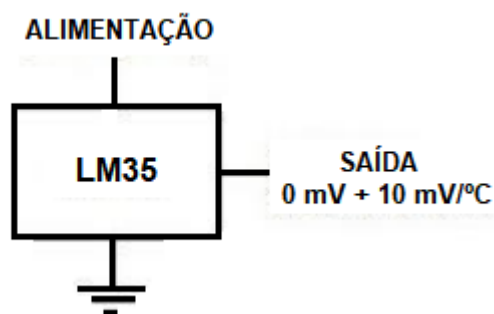
2.1.2 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura utilizado é o LM35, sendo um dos sensores de uso mais comum no mercado. Ele possui a capacidade de fornecer, com exatidão, valores de temperatura entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. O sensor possui saída de baixa impedância, tensão linear e calibração inerente precisa, tornando a interface de leitura simples. Além disso, o sensor possui uma alimentação flexível, podendo ser alimentado com 5 V a 12 V (CRESPI; CERON, 2009; MATOS, 2016). A Tabela 2 mostra as características do sensor LM35 (INSTRUMENTS, 2016).

Tabela 2 – Especificações do sensor de temperatura LM35

| | |
|------------------------------------|---|
| Tensões máximas de alimentação | $-0,2\text{ V}$ a $+35\text{ V}$ |
| Tensões de saída | $-1,0\text{ V}$ a $+6,0\text{ V}$ (máx) |
| Corrente de saída máxima | 10 mA |
| Ganho típico do sensor | $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ |
| Faixas de temperaturas de operação | $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ |

Figura 19 – Sensor de temperatura LM35



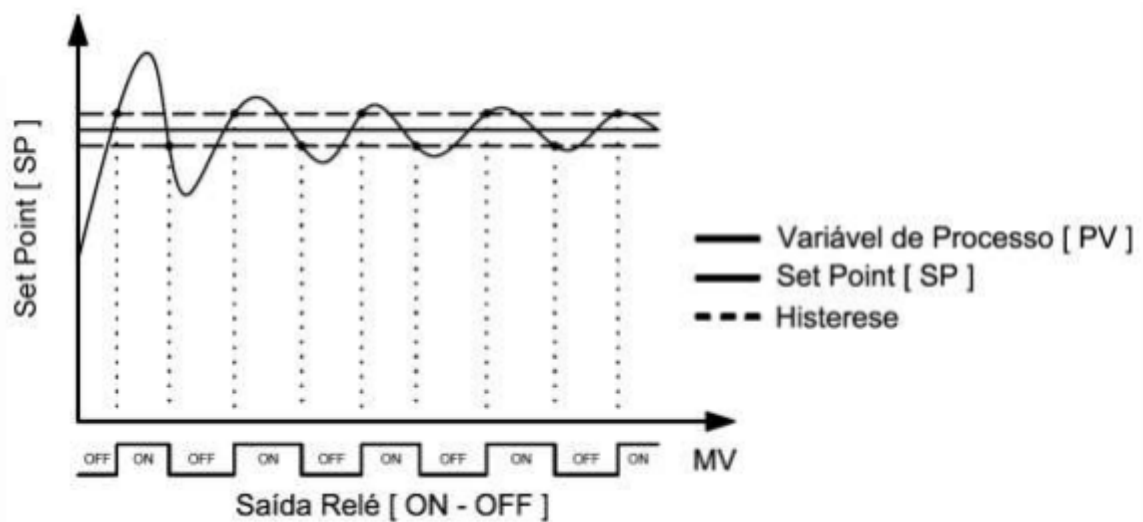
Fonte: Adaptada de Instruments (2016).

2.2 Projeto do código

2.2.1 Esquema de controle

Conforme citado anteriormente, a metodologia aplicada é o controle *on-off*, em virtude do baixo custo e simplicidade, uma vez que o sinal de entrada é comparado com dois sinais de referência, denominados limite superior e limite inferior. A diferença entre os extremos é chamada de histerese (H), ajustada para que o valor desejado (*set-point*), SP, fique entre o limite inferior e superior (MARTINEZ, 2015). O intervalo diferencial mantém o valor atual da saída do controlador até que o sinal de erro tenha se movido ligeiramente além do valor de zero (OLIVEIRA, 1999).

Figura 20 – Controle *on-off* com histerese



Fonte: Engelogic (2020).

Na Figura 20 temos a representação do controle *on-off* com histerese (H). Quando a variável de processo (PV), nesse caso a temperatura, for superior ao *set-point* somado à histerese, o atuador (A) é ligado. Caso a temperatura for inferior a subtração do *set-point* somado com a histerese, o atuador (A) fica desativado. Essa relação é expressa em 2.1.

$$A = \begin{cases} On, & se T > SP + H \\ Off, & se T < SP - H \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.2 Modos de operação

O algoritmo de controle implementado possui cinco modos gerais de operação distintos, os quais são descritos a seguir.

1. **Modo Gravação:** neste modo o usuário pode alterar os parâmetros de controle, sendo eles *Set-point* (SP), Histerese (H), Número de ciclos (N) para degelo, Tempo

de degelo (t_{deg}) e Temperatura de degelo (T_{deg}) por meio de comunicação serial via USB. Uma interface foi criada para facilitar a interação do usuário com o sistema.

2. **Modo *Power-up***: este modo de operação tem início quando o *freezer* é ligado pela primeira vez, sendo um modo vigente de $t = 0$ até o sistema atingir o regime permanente. Trata-se de uma etapa onde é verificado o correto funcionamento do atuador (motor do compressor) e do sensor de temperatura.
3. **Modo de controle**: este modo de operação entra em vigor a partir do ponto que o sistema atinge o regime permanente sendo, de fato, o modo de operação onde o algoritmo central de controle é aplicado, descrito em 2.2.1.
4. **Modo *Service***: este modo emite determinado sinal binário por meio de LED's, relacionando alguma situação não-ideal ocorrida com o sistema, a fim de simplificar o diagnóstico de falhas pelo operador.
5. **Modo Degelo**: este modo ativa uma resistência de degelo situada no evaporador em virtude da quantidade de ciclos de resfriamento completados pelo sistema de controle.

Para exemplificar os parâmetros de controle do projeto, considere as Figuras para a Vitrine de Bebidas de 280 L da Metalfrio Solutions¹. Na Figura 21 tem-se o *Initial Pull Down Time*, tempo gasto para que a temperatura caia de valor ambiente para o *set-point*. Pode-se notar através da corrente do compressor que ele desliga periodicamente (faz o degelo), o que permite o controle do tempo de duração do degelo, parâmetro que pode ser ajustado no código.

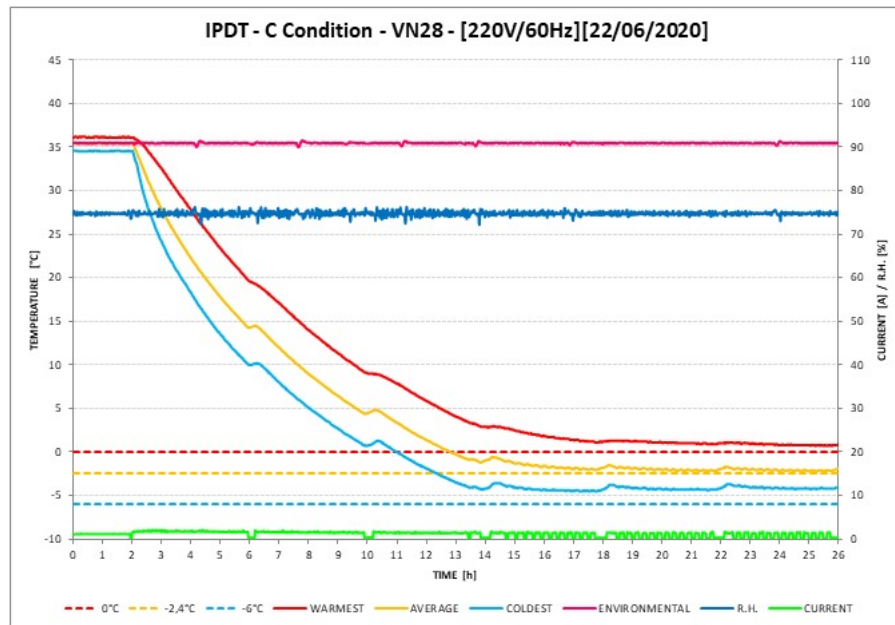
Na Figura 22 é apresentado o teste de consumo de energia do produto. Este já se encontra em modo controle. Por meio do gráfico pode-se analisar os ciclos, definidos pelo valor do *set-point* e da histerese, além da temperatura média.

Por fim, na Figura 23, pode-se analisar graficamente a transição do produto entre o modo econômico e o modo normal. Em outras palavras, trata-se da mudança no valor do *set-point* de operação do sistema de controle.

2.2.3 Especificação da operação das rotinas do código

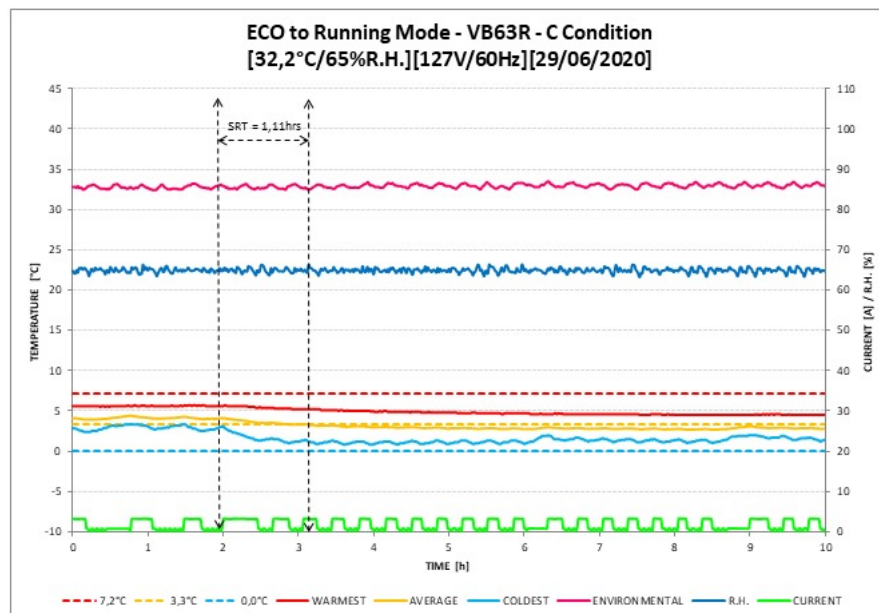
Após inicialização do sistema embarcado o algoritmo progride para o modo *Power-up*. Conforme descrito na seção 2.3.2, é feita uma verificação do correto funcionamento do atuador e do sensor por meio da seguinte lógica: iniciado o modo *Power-up*, a temperatura atual inicial T_o é arquivada e o sistema opera por 10 minutos de forma ininterrupta. Após

¹ A Metalfrio Solutions é uma empresa produtora e fornecedora de soluções na indústria de refrigeração comercial

Figura 21 – *Initial Pull Down Time*

Fonte: Metalfrio Solutions.

Figura 22 – Teste de consumo de energia

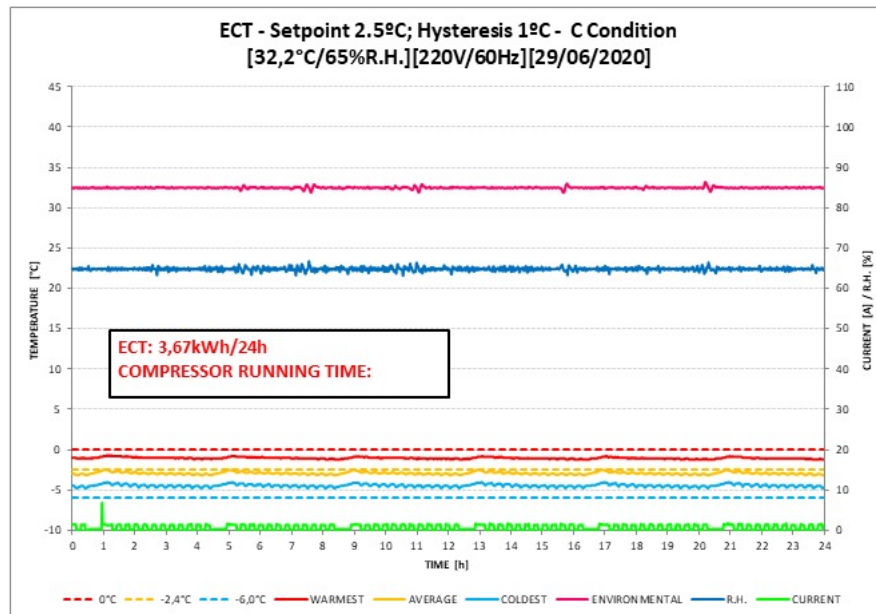


Fonte: Metalfrio Solutions.

esse tempo, a nova temperatura T_{nova} é medida. A verificação do correto funcionamento é feita da seguinte forma:

1. Se $T_o > T_{nova}$ pode-se inferir que a temperatura está decrescendo e, portanto, temos um correto funcionamento do sensor/atuador.
2. Se $T_o \leq T_{nova}$ pode-se inferir que a temperatura aumentando ou se mantendo constante e, portanto, temos um funcionamento incorreto do sensor/atuador.

Figura 23 – Transição entre o Modo Econômico e o Modo Normal

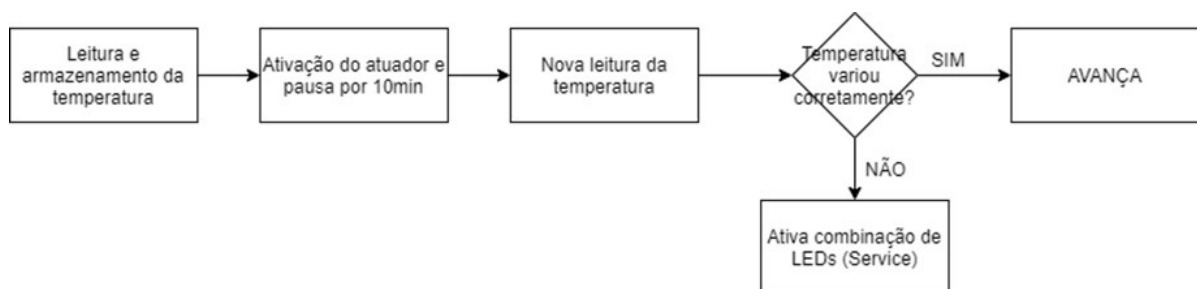


Fonte: Metalfrio Solutions.

É importante ressaltar que, caso a condição descrita em 2.2.3.2 seja satisfeita, a irregularidade pode estar presente no sensor ou no atuador. Nesse caso, o sistema entra no Modo Service e o LED vermelho é acionado, indicando o funcionamento incorreto e a necessidade de manutenção.

Em seguida será testado o conjunto sensor-atuador de degelo, isto é, o LM35 e a resistência de degelo, ambos situados junto ao condensador. Desligado o motor, a temperatura no condensador é obtida e armazenada e a resistência é ativada por 10 minutos. Após esse tempo, a temperatura no condensador é novamente medida. Caso ela tenha aumentado, entende-se que o conjunto sensor-atuador está em correto funcionamento. Caso contrário, entende-se que há algum problema com o conjunto sensor-atuador de degelo e ambos os LED's são acionados e o código é interrompido. Caso o sistema esteja com um correto funcionamento, isto é, se a condição 2.2.3.1 for válida, temos uma progressão para o modo de controle. O fluxograma do modo Power-up está exibido na Figura 24.

Figura 24 – Fluxograma para o modo de operação Power-up

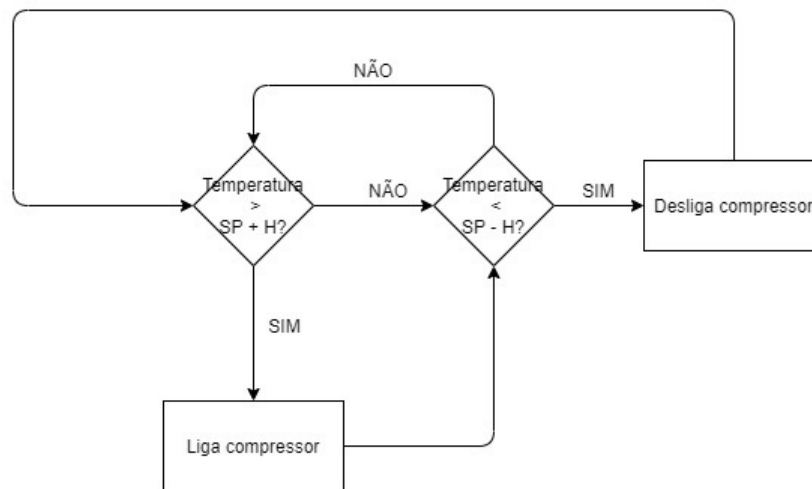


Fonte: Elaborada pelo autor.

O modo de controle é a base do mecanismo de controle de temperatura, sendo

formado essencialmente por blocos comparadores para verificar e a temperatura atual T_o satisfaz as condições definidas pelo usuário no Modo Gravação. Se $T_o > SP + H$ o motor do compressor é acionado e, em seguida, verifica-se se $T_o \leq SP - H$. Em caso afirmativo, o compressor é desligado e o código retorna ao primeiro comparador. Assim, torna-se evidente o funcionamento *on-off* na linha de código. Essa relação é expressa matematicamente na Equação 2.1 e graficamente na Figura 20. O fluxograma da operação no Modo Controle é exibido na Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma para o modo de operação Controle



Fonte: Elaborada pelo autor.

Operando em modo de controle, a comunicação do sistema com o usuário pode ser requisitada a qualquer instante. Caso haja *bits* para leitura na porta USB durante o ciclo de controle o código armazena esses dados na EEPROM do PIC nos endereços específicos. Com os parâmetros de controle atualizados pelo usuário, o modo de controle agora opera com os novos dados. Note que o código requer comunicação com o usuário apenas uma vez, haja visto que os dados são armazenados na EEPROM. Ou seja, desligado o controlador, na próxima vez que o mesmo for ligado novamente o código irá operar com os dados gravados anteriormente. Caso o controlador seja ligado sem nenhuma gravação prévia de dados, serão utilizados valores padrão como *default* exibidos na Tabela 3.

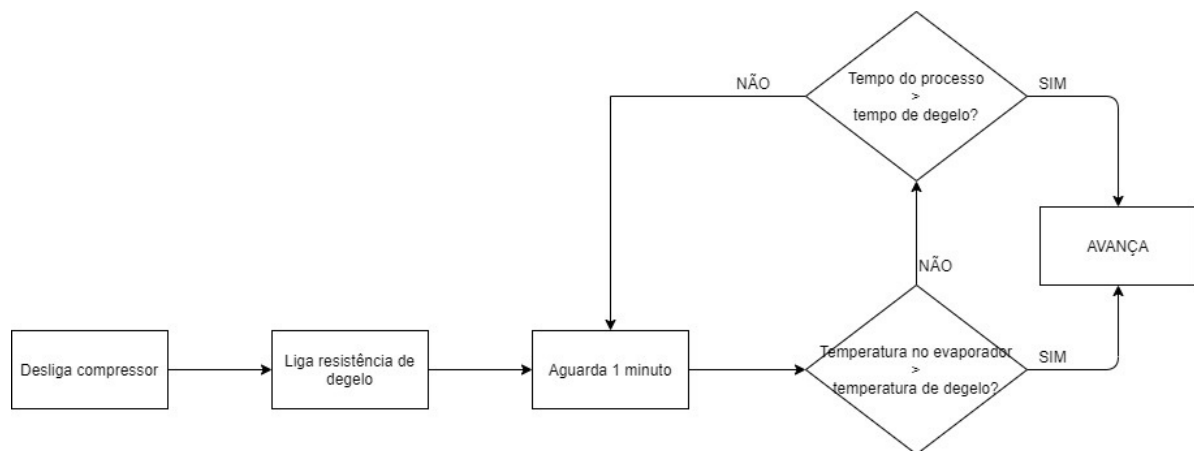
Tabela 3 – Valores *default* para o esquema de controle

| Parâmetro | Abreviatura | Valor padrão |
|--|-------------|--------------|
| Temperatura de controle (<i>set-point</i>) | SP | 4 °C |
| Histerese | H | 2 °C |
| Número de ciclos para degelo | N | 30 |
| Temperatura máxima de degelo | T_{deg} | 10 °C |
| Tempo máximo de degelo | t_{deg} | 40 minutos |

Toda vez que o motor do compressor é desligado considera-se que o sistema passou por um ciclo completo de controle (ou seja, temperatura ultrapassou o limite desejado,

compressor foi ligado e, passado um tempo, a temperatura ficou inferior ao mínimo desejado, desligando-se o compressor). Completados N ciclos de refrigeração no controle *on-off*, o Modo Degelo é acionado. Uma resistência de degelo ligada ao condensador é ativada e a temperatura deste irá aumentar. Após acionado, este modo de operação permanece funcionando durante o tempo de degelo t_{deg} setado pelo usuário ou até que a temperatura no condensador atinja a temperatura de degelo T_{deg} pré-definida. O LED azul indica que o sistema opera em Modo Degelo. A cada minuto a temperatura do condensador é novamente medida. O fluxograma da operação em modo degelo é exibido na Figura 26.

Figura 26 – Fluxograma para o modo de operação Degelo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os diferentes estados de operação do esquema de controle proposto podem apresentar problemas de funcionamento que devem ser repassados para o usuário de maneira simples, além de fornecer informação do modo de operação no qual o código se encontra. Para tal, o Modo *Service* possui dois LED's de cores diferentes cuja combinação pode fornecer $2^N = 2^2 = 4$ estados diferentes, exibidos na Tabela. O *bit* 1 representa o LED ligado, enquanto o *bit* 0 representa o LED desligado.

Tabela 4 – Indicação do estado de operação do código de controle por meio dos LED's

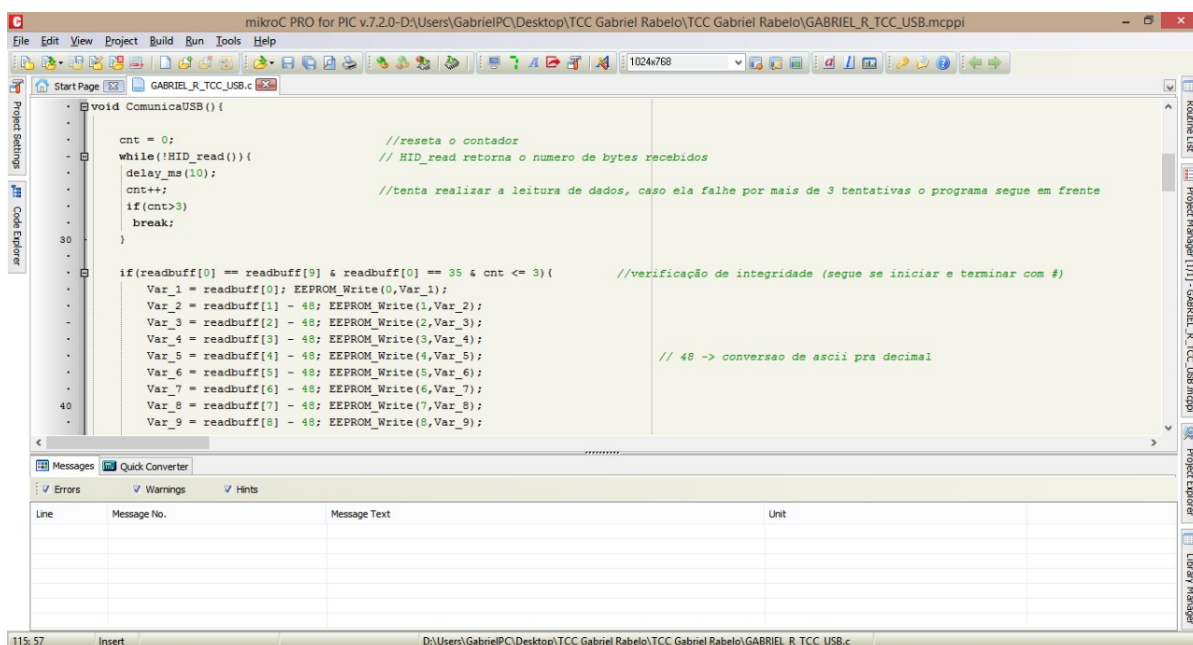
| Estado | LED Vermelho | LED Azul | Informação |
|--------|--------------|----------|--|
| 1 | 0 | 0 | Operação normal (nenhum problema encontrado) |
| 2 | 0 | 1 | Sistema em Modo Degelo |
| 3 | 1 | 0 | Problema no conjunto sensor-atuador no controle de temperatura interna durante a rotina de <i>Power-Up</i> * |
| 4 | 1 | 1 | Problema no conjunto sensor-atuador no controle de temperatura de degelo* |

(*) O sistema permanecerá com funcionamento impedido até que o problema seja resolvido.

2.2.4 Simulação no *software* Proteus e montagem

Para implementação do código especificado no fluxograma, utilizou-se um programa em linguagem C por meio do *software* MikroC IDE. Podemos definir a MikroC como uma linguagem de programação útil para programar e controlar as ações de um microcontrolador PIC. Esta linguagem possui um poderoso compilador conhecido como "MikroC PRO for PIC", que funciona como um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) no qual o programa MikroC² é gravado, testado e executado. A partir deste eficiente compilador, o arquivo pode ser armazenado e transferido para o PIC que, então, responderá de acordo com das instruções do código programado (AHANEKU; CHUKWUNWIKE; NAWAWELU, 2019). Na Figura 27 temos uma captura do Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) do MikroC PRO para compilador PIC.

Figura 27 – Ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do MikroC PRO



Fonte: Gerada pelo *software* MikroC PRO v.7.2.0

Após a gravação do código programado no PIC, o sistema foi simulado no *software* Proteus, um simulador orientado à execução para máquinas. Ele produz simulações precisas com uma alta velocidade, além de ter uma estrutura modular que permite ampla variedade de arquiteturas simuladas, facilitando a personalização (BREWER et al., 1992). Em adição, ele fornece suporte integrado para coleta e exibição de dados de monitoramento e depuração não invasivos (SHIN et al., 2017; BREWER et al., 1992).

Em termos da simulação, realizada no *software* Proteus, utilizou-se LED's para simular as saídas do sistema de controle. Ele também conta com blocos próprios que emulam o funcionamento do sensor LM35 retornando a saída em volts a partir da leitura

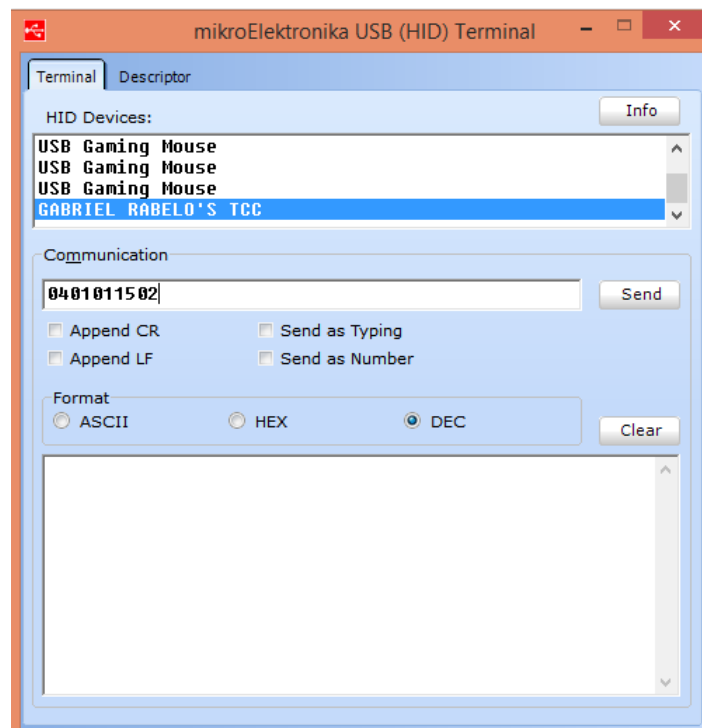
² A MikroC é uma marca registrada da mikro-Elektronika

de temperatura escolhida pelo usuário. Além disso, utilizou-se um bloco que representa o microcontrolador e pode ser configurado com o *clock* desejado, e que também simula a memória EEPROM.

2.2.4.1 Comunicação serial USB para alteração do *firmware*

Para a comunicação serial com o usuário através do protocolo USB, utilizou-se o bloco HID terminal do MikroC, conforme exibido na Figura 42. Nele, será recebido um *buffer* com 10 caracteres e posição de gravação na memória EEPROM conforme exemplificado na Tabela 5.

Figura 28 – HID Terminal do MikroC para comunicação serial



Fonte: Gerada pelo *software* MikroC PRO v.7.2.0

Tabela 5 – Interpretação do pacote de caracteres recebidos via comunicação serial USB

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Caractere | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 5 | 0 | 2 |
| Posição na memória EEPROM | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

Os dois primeiros *bytes* formam a temperatura de *set-point*, sendo o primeiro a dezena e o segundo a unidade. No exemplo, o *set-point* seria $SP = (0 \times 10) + (4 \times 1) = 4$ graus Celsius. O terceiro e o quarto *bytes* formam a histerese representando, respectivamente, a dezena e a unidade. No caso do exemplo, a histerese seria $H = (0 \times 10) + (1 \times 1) = 1$ grau Celsius. O quinto e o sexto *bytes* formam o número de ciclos desejados para que se entre em modo de degelo, dividido por dez, sendo aquele a dezena e este a unidade. No caso do exemplo, o número de ciclos para entrar em modo degelo seria $N = [(0 \times 10) + (1 \times 1)] \times 10 =$

10 ciclos. O sétimo e o oitavo *bytes* formam a temperatura máxima de degelo, sendo aquele a dezena e este a unidade. No exemplo, a temperatura máxima de degelo seria de $T_{deg} = (1 * 10) + (5 * 1) = 15$ graus Celsius. Por fim, o nono e o décimo *bytes* formam o tempo máximo de degelo em minutos sendo, respectivamente, a dezena e este a unidade. No exemplo, o tempo máximo de degelo seria $t_{deg} = (0 * 10) + (2 * 1) = 2$ minutos.

Os valores recebidos através do *buffer* estão em ACSII³. Portanto, antes de serem gravados na EEPROM eles devem ser convertidos em valores inteiros. A fórmula para converter um código ACSII X_{ACSII} em um valor inteiro X_{int} é dado por:

$$X_{int} = X_{ACSII} - 48 \quad (2.2)$$

2.2.4.2 Especificação das conexões do sistema de controle nas portas do microcontrolador

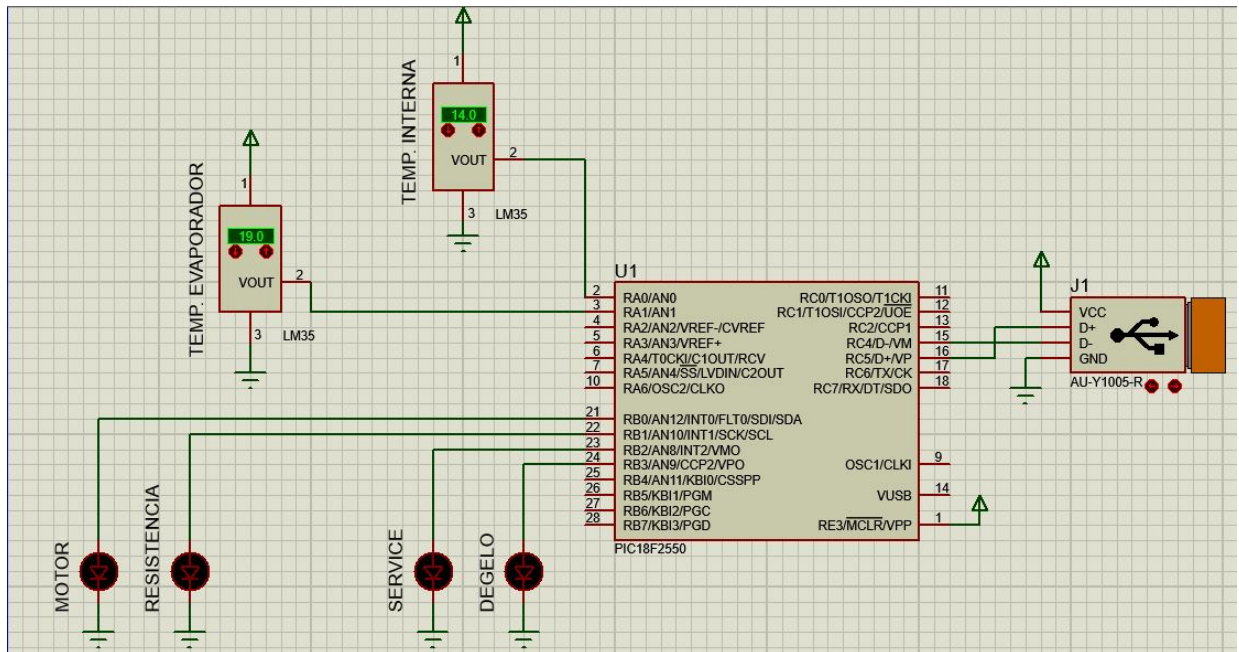
As informações de conexão das portas do microcontrolador são apresentadas na Tabela 6. O pino de alimentação do módulo USB foi alimentado com 5 V e o pino de referência conectado ao terra. O mesmo esquema foi utilizado para a alimentação do LM35, alimentando-o com 5 V entre os pinos 1 e 3. Utilizou-se o *clock* de 4 MHz interno do PIC, uma vez que não há a necessidade de alta precisão de tempo. As conexões estão exibidas na Figura 29. O termo "resistência" refere-se à resistência de degelo, enquanto o termo "motor" refere-se ao motor do compressor.

Tabela 6 – Conexão das portas de entrada, saída e comunicação serial do PIC

| Pino | Porta | Especificação |
|------|---------------------------------------|---|
| 1 | Vpp | Alimentação do PIC em 5V |
| 2 | Porta de entrada analógica 0 (AN0) | Medição de temperatura interna pelo LM35 |
| 3 | Porta de entrada analógica 1 (AN1) | Medição de temperatura do condensador pelo LM35 |
| 15 | Comunicação serial D- | Comunicação USB |
| 16 | Comunicação serial D+ | Comunicação USB |
| 21 | Saída digital do bit 0 do PORTB (RB0) | Saída de controle do motor |
| 22 | Saída digital do bit 1 do PORTB (RB1) | Saída de controle da resistência de degelo |
| 23 | Saída digital do bit 2 do PORTB (RB2) | Saída de controle LED vermelho |
| 24 | Saída digital do bit 3 do PORTB (RB3) | Saída de controle LED azul |

³ Código baseado no alfabeto alfa-romano para padronização da representação de letras, acentos, números, etc em computadores

Figura 29 – Conexões nas portas do microcontrolador



Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

2.3 Estudo de casos

Para as simulações da operação do código de controle desenvolvido, alguns estudos de caso são propostos, buscando analisar cada uma das etapas de forma separada e, posteriormente, a ação completa do sistema de controle. Os estudos de casos analisados estão descritos seguir.

1. **Estudo de caso 1:** após a gravação de dados concluída, simula-se o incorreto funcionamento do sensor-atuador para controle de temperatura interna no Modo *Power-up*.
2. **Estudo de caso 2:** após a gravação de dados concluída, simula-se o incorreto funcionamento do sensor-atuador para controle de temperatura de degelo no Modo *Power-up*.
3. **Estudo de caso 3:** verifica-se o funcionamento da lógica de controle *on-off* proposta no Modo Controle. O código foi gravado para *set-point* $SP = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e histerese $H = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. **Estudo de caso 4:** verifica-se o funcionamento completo do sistema de controle. Utilizou-se como entrada de temperatura interna uma onda senoidal com amplitude de $0,02\text{ V}$ e centrada em $0,04\text{ V}$, ou seja, pico máximo em $0,05\text{ V}$ e pico mínimo em $0,03\text{ V}$. A temperatura no condensador foi simulada como uma onda senoidal com amplitude de $0,3\text{ V}_{pp}$ e período de 40 s . Conforme as especificações do LM35, isso corresponde a uma variação de temperatura de 3 a 5 graus Celsius. O código

foi gravado para *set-point* $SP = 4\text{ }^{\circ}C$, histerese $H = 1\text{ }^{\circ}C$, Número de ciclos para degelo $N = 10$, temperatura máxima de degelo $T_{deg} = 15\text{ }^{\circ}C$ e tempo máximo de degelo $t_{deg} = 2\text{ min}$.

5. **Estudo de caso 5:** (a) simula-se a comunicação em tempo real via USB com o usuário para duas alterações distintas. Inicialmente, o código está setado para *set-point* $SP = 4\text{ }^{\circ}C$ e histerese $H = 1\text{ }^{\circ}C$, sendo alterado para para *set-point* $SP = 30\text{ }^{\circ}C$ e histerese $H = 2\text{ }^{\circ}C$ em $t = 17\text{ s}$. (b) No segundo caso, altera-se *setpoint* e histerese de $SP = 30\text{ }^{\circ}C$ e $H = 10$ para $SP = 3\text{ }^{\circ}C$ e $H = 1\text{ }^{\circ}C$ em $t = 29\text{ s}$.

3 Resultados e discussões

O sistema de controle desenvolvido foi simulado em diversas condições distintas de operação, as quais serão apresentadas neste capítulo. Inicialmente, pode-se perceber através do IDE da MikroC que, durante a etapa de gravação, uma baixa quantidade de memória é utilizada, como exibido na Figura 30. Deve-se notar que esta característica permite que o microcontrolador tenha uma ampla margem de memória para futuras alterações de *firmware*.

Figura 30 – Uso da memória do PIC na etapa de gravação

The screenshot shows the MikroC IDE interface. The main editor window contains C code for a temperature control system. The code includes logic for reading EEPROM data, calculating cycles and temperature, and setting points. Below the code, the Messages window displays the output of the compilation process. The messages include:

- Line 127: All files Compiled in 234 ms
- Line 1144: Used RAM (bytes): 330 (16%) Free RAM (bytes): 1697 (84%)
- Line 1144: Used ROM (bytes): 8725 (27%) Free ROM (bytes): 24043 (73%)
- Line 125: Project Linked Successfully
- Line 128: Linked in 125 ms
- Line 129: Project 'GABRIEL_R_TCC_USB.mcppi' completed: 406 ms
- Line 103: Finished successfully: 08 nov 2020, 22:03:24

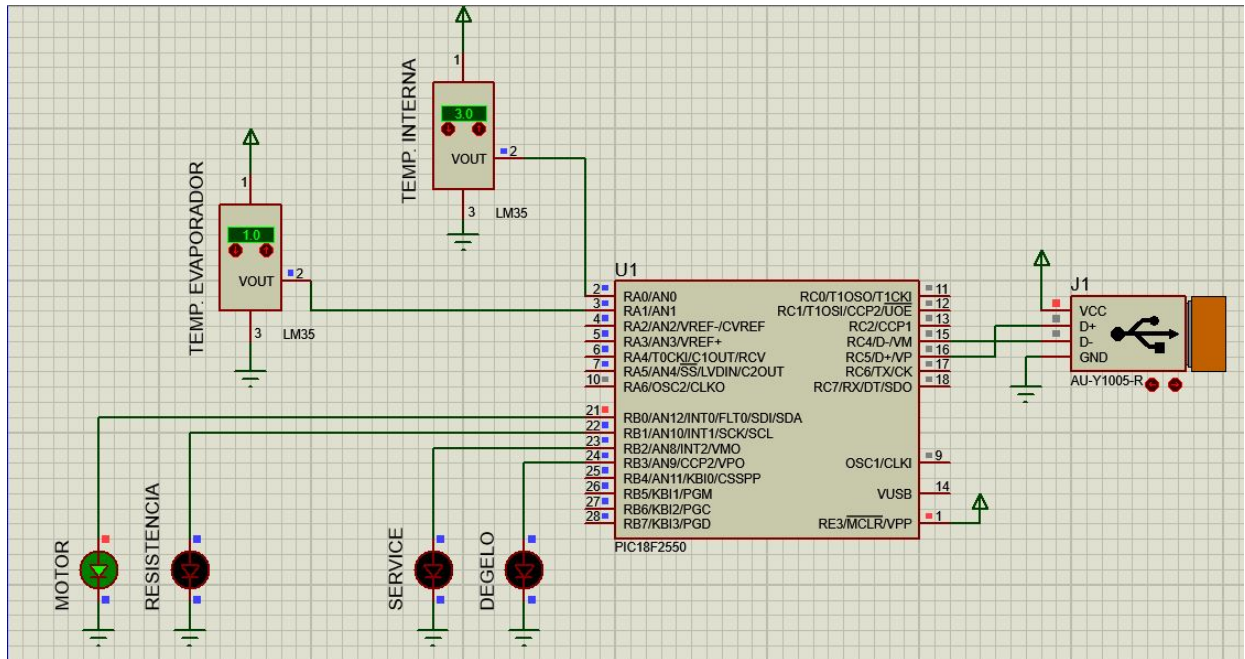
Fonte: Gerada pelo *software* MikroC PRO v.7.2.0

3.1 Estudo de caso 1: Falha no conjunto sensor-atuador no Modo *Power-Up* para temperatura interna

Após o Modo Gravação, o código prossegue para o Modo *Power-Up*, no qual são feitas verificações do funcionamento do sistema, como descrito anteriormente. Considere a situação representada na Figura 31. Inicialmente, o compressor encontra-se ligado e a temperatura interna é de $3^{\circ}C$. Passado o tempo para nova medição, ocorre um aumento da

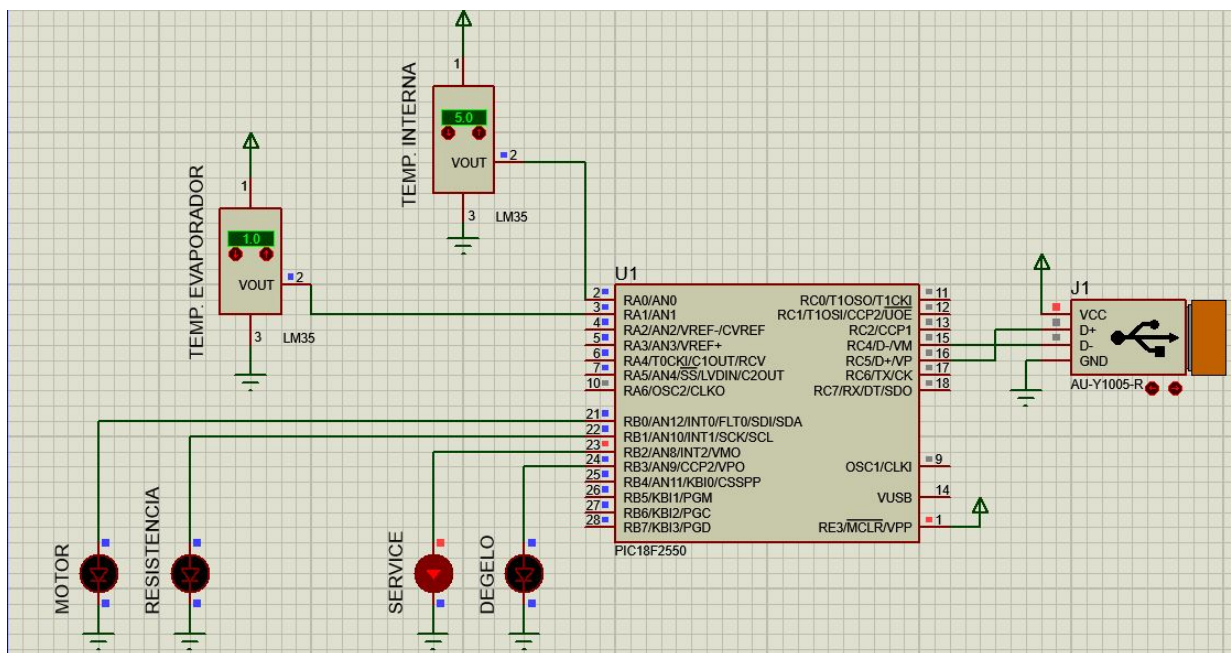
temperatura para 5°C , uma situação indesejada. Assim, desliga-se o compressor e o LED vermelho é ativado, conforme exibido na Figura 32. Isto indica existência de problema no conjunto sensor-atuador no controle de temperatura interna durante a rotina de *Power-Up*, conforme a Tabela 4.

Figura 31 – Operação incorreta no Modo *Power-Up* para temperatura interna



Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

Figura 32 – Indicação de falha no conjunto sensor-atuador para temperatura interna

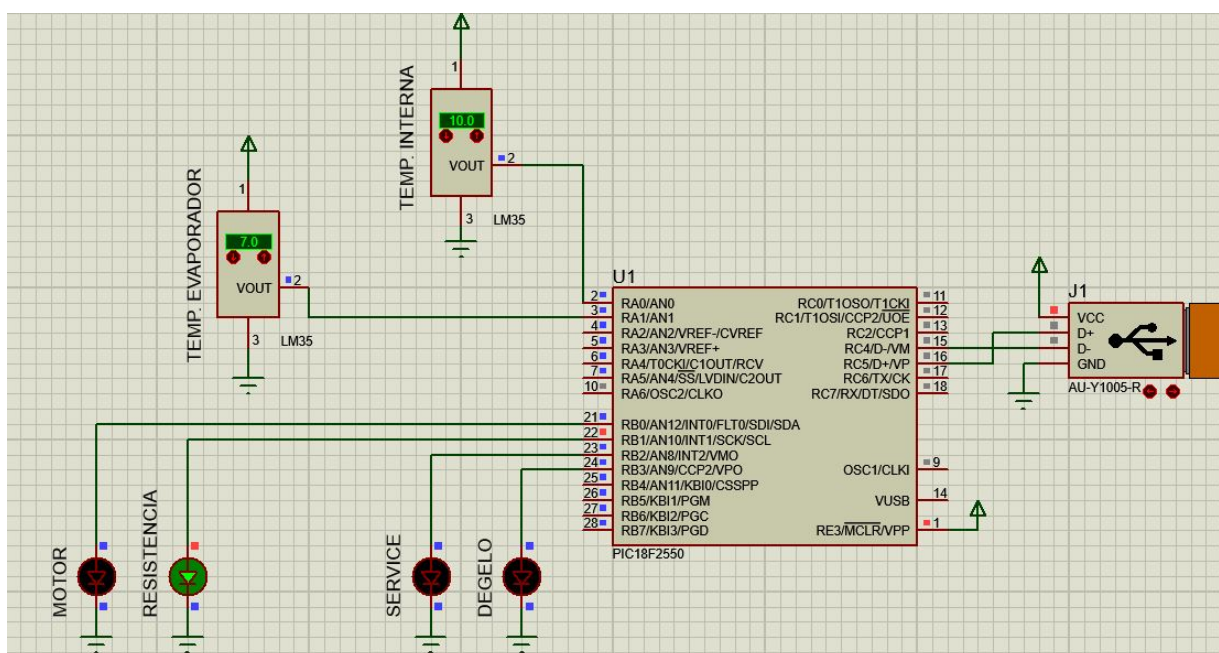


Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

3.2 Estudo de caso 2: Falha no conjunto sensor-atuador no Modo *Power-Up* para temperatura de degelo

Considerando que o funcionamento do conjunto sensor-atuador para temperatura interna esteja com o funcionamento correto, a próxima etapa é realizar o teste para o conjunto sensor-atuador do Modo Degelo. No início deste modo de operação, a resistência de degelo é ativada. A temperatura inicial é de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta situação está exibida na Figura 33.

Figura 33 – Operação incorreta no Modo *Power-Up* para temperatura de degelo



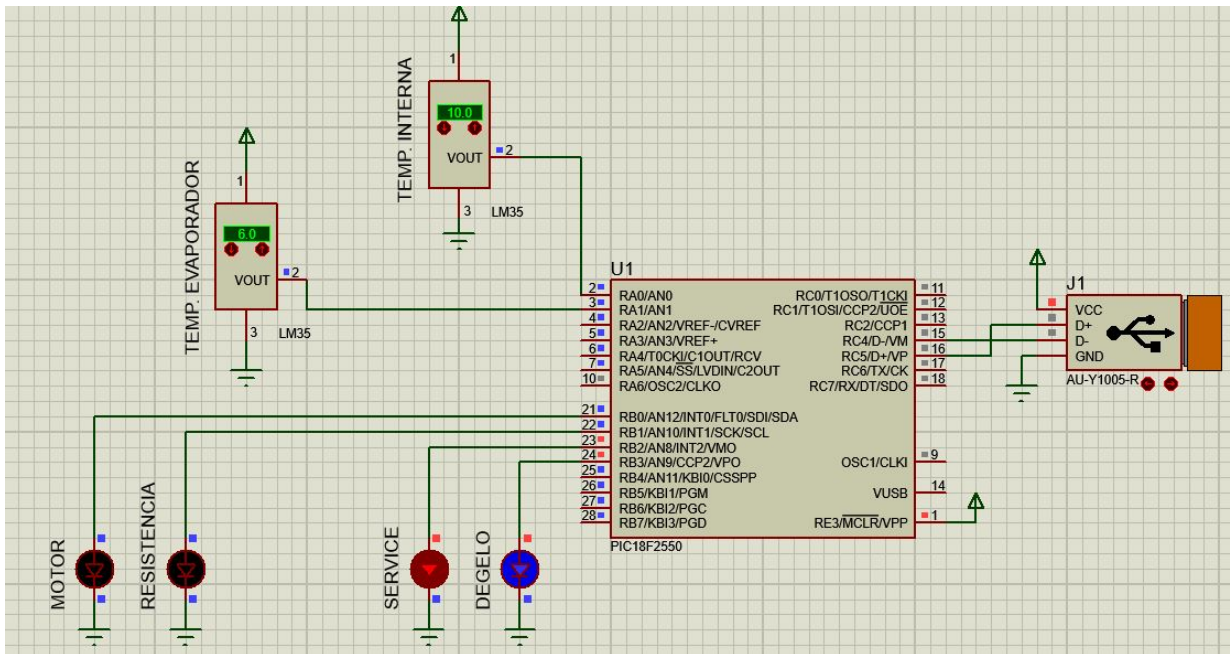
Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

Após a segunda medição, verifica-se que a temperatura havia caído para $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando problema no conjunto sensor-atuador no controle de temperatura de degelo. Por consequência, os dois LED's (azul e vermelho) são ativados, conforme previsto na Tabela 4. Esta situação está exibida na Figura 34.

3.3 Estudo de caso 3: Operação da lógica *on-off* no Modo Controle

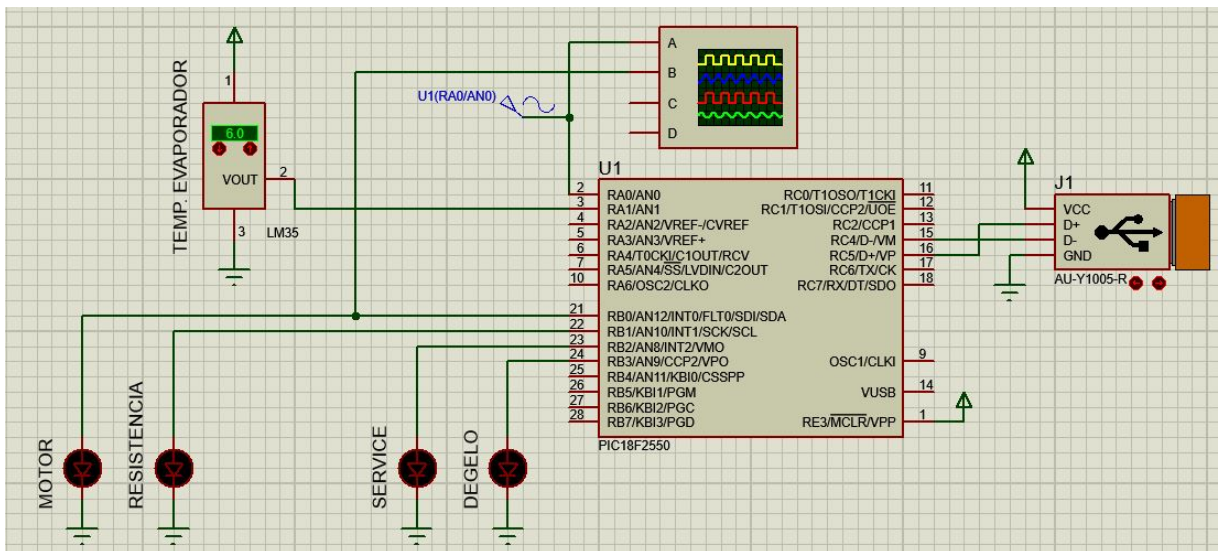
Para verificação da operação do código proposto no Modo Controle, utilizou-se o osciloscópio do Proteus com a entrada (amarelo) sendo a onda senoidal e a saída (azul) o estado lógico do motor, conforme a montagem. Note como o motor é ativado quando a temperatura ultrapassa $SP + H$ e desativado quando fica inferior a $SP - H$, como exibido nas Figuras 35 e 36.

Figura 34 – Indicação de falha no conjunto sensor-atuador para temperatura de degelo



Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

Figura 35 – Operação no Modo Controle

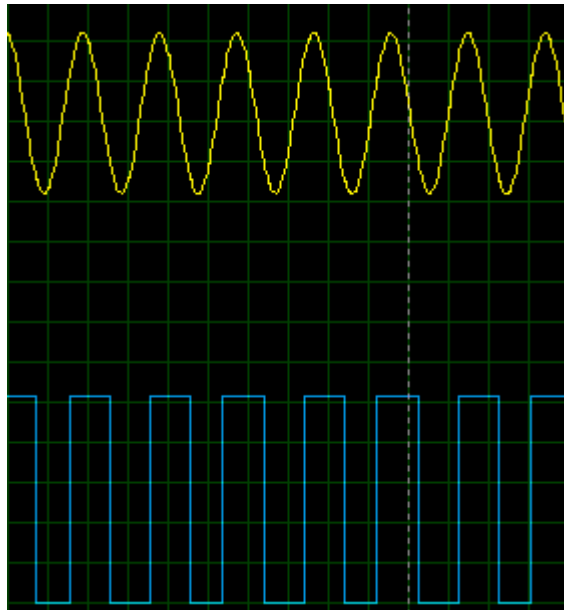


Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

3.4 Estudo de caso 4: Operação completa do sistema de controle

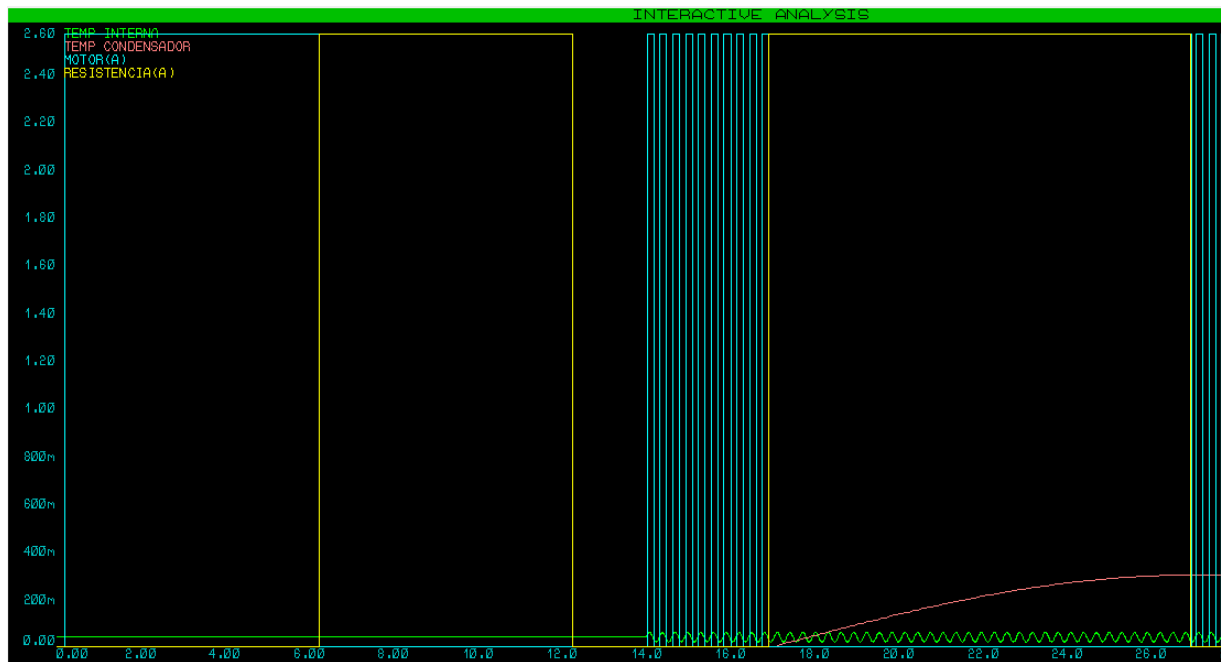
Para simulação da operação completa do sistema de controle algumas informações extras são importantes. Reduziu-se o tempo entre as medições do *Power-Up* para 6 s e o tempo entre as medições do Modo Degelo para 10 s. O resultado está exibido na Figura 37. Durante esta etapa, a temperatura interna (verde) e a temperatura do condensador (rosa) foram mantidas fixas.

O sistema iniciou-se e entrou em modo *Power-up*, testando o conjunto sensor+atuador

Figura 36 – Atuação *on-off* da lógica de controle proposta

Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

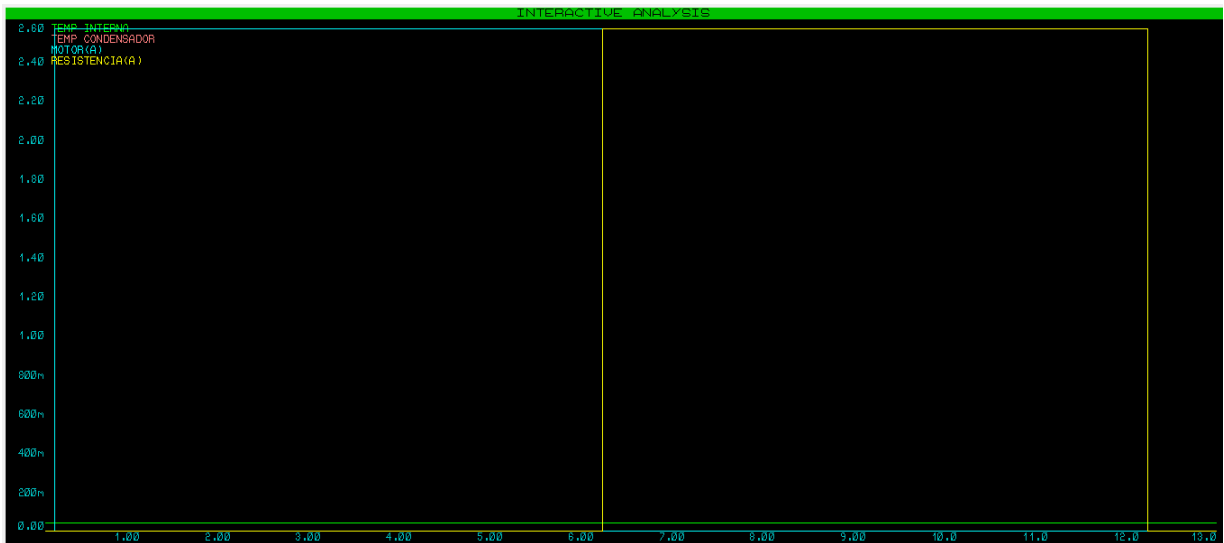
Figura 37 – Operação completa do sistema de controle proposto



Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

do controle de temperatura interna durante 6 s. Após esse tempo, o motor (azul) foi desligado e a resistência (amarelo) ligada para efetuar o teste de *Power-up* do conjunto sensor+atuador do degelo. Após mais 6 s a temperatura foi inferior a $SP - H$, conforme exibido na Figura 38.

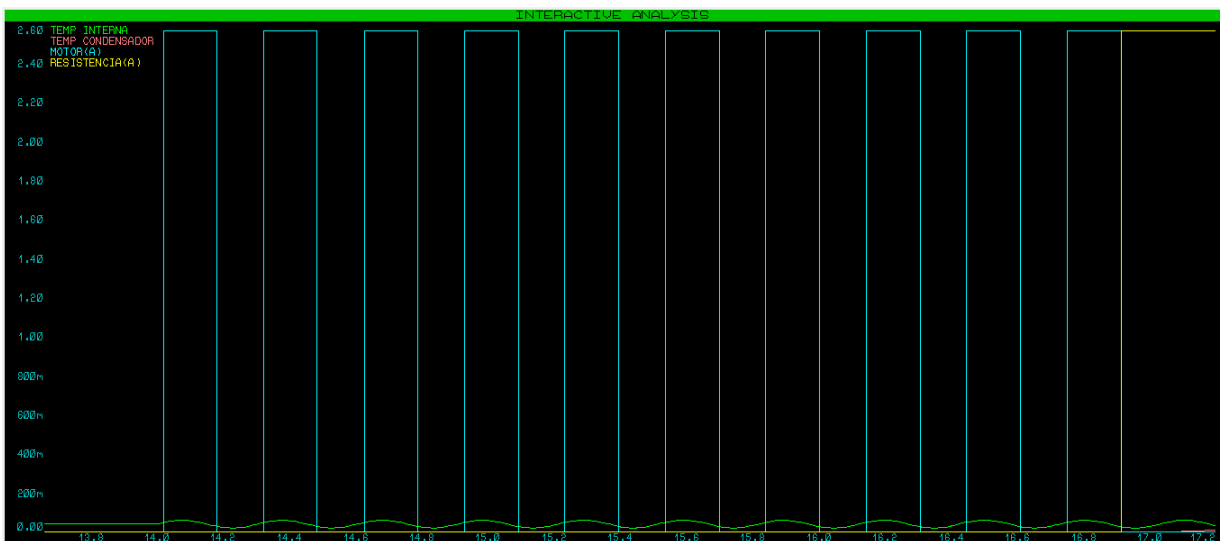
Na sequência, quando a simulação atingiu 14 s a temperatura interna começou a oscilar entre 3 e 5 graus. Note que, quando a temperatura atinge 5 graus ($SP + H$) o motor (azul) é ativado, e quando atinge 3 graus ($SP - H$) o motor é desligado. Após 10

Figura 38 – Etapa de *Power-up* na operação completa do sistema de controle

Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

ciclos, o motor foi desligado e a resistência de degelo foi ativada, ou seja, o sistema entrou em modo de degelo. Esta situação está exibida na Figura 39.

Figura 39 – Modo controle na operação completa do sistema de controle

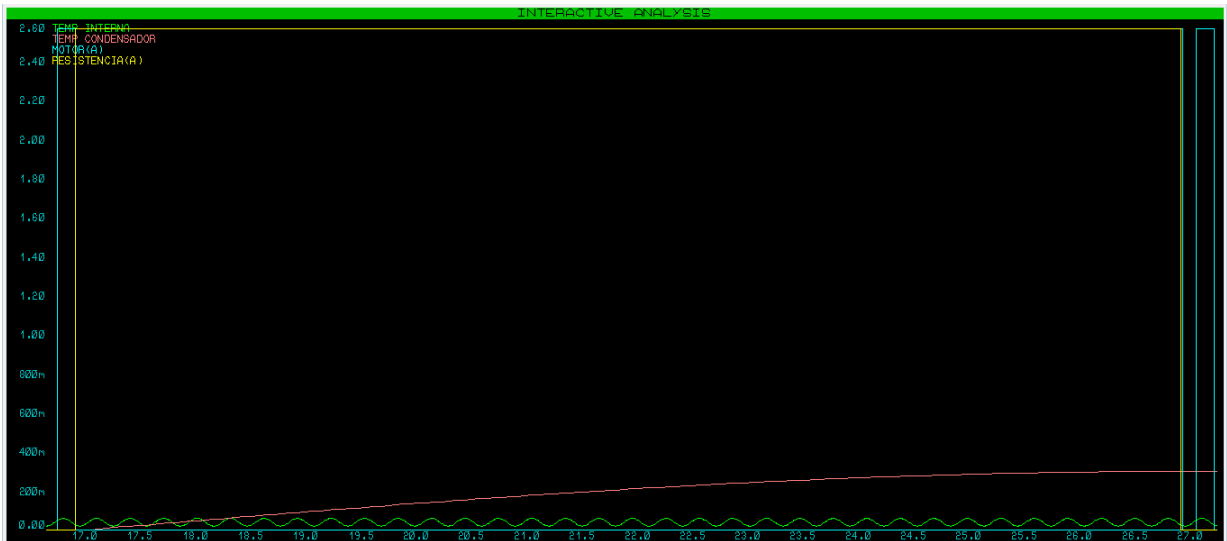


Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

Na simulação, a temperatura interna foi mantida fixa. Assim, a senoide que representa a variação da temperatura interna continuou oscilando (verde). Apesar disso, o sistema ignorou essa variação e não ativou o condensador, respeitando o ciclo de degelo. Quando a simulação atingiu 17 s, a temperatura do condensador começou a subir (conforme planejado), para simular a resposta à ativação da resistência. Depois de 10 s, o sistema verificou novamente a temperatura do condensador e constatou que estava acima dos 15 graus setados (0, 15 V), encerrando o modo degelo e desativando a resistência. Com isso, retornou-se ao modo de controle de temperatura. Estas situações estão exibidas na

Figura 40.

Figura 40 – Modo degelo na operação completa do sistema de controle



Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

3.5 Estudo de caso 5: Comunicação em tempo real via USB com o usuário para alteração dos parâmetros de controle

(a) A alteração dos parâmetros de controle pelo usuário através da comunicação serial USB pode ser analisada na Figura 41. Aos 17 s de simulação, ocorre a alteração e regravação dos parâmetros alterando o valor do *set-point* e da histerese de 4 °C e 1 °C para 30 °C e 2 °C, respectivamente. Pode-se notar que o motor (rosa) é desligado, permitindo com que a temperatura suba até 30 °C e, posteriormente, oscile entre 28 °C e 32 °C através da lógica *on-off*.

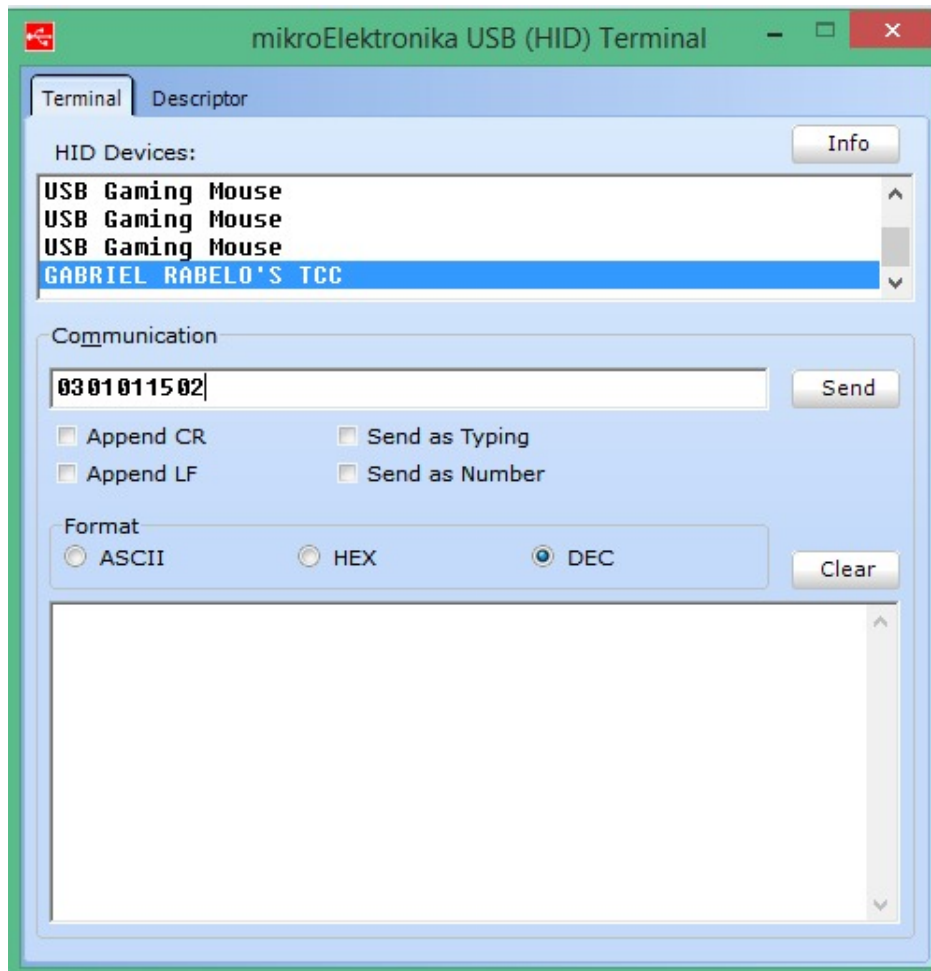
(b) Aos 29 s de simulação, ocorre a alteração e regravação dos parâmetros alterando o valor do *set-point* e da histerese de 30 °C e 10 °C para 3 °C e 1 °C, respectivamente. Esta situação está apresentada nas Figuras 42 e 43. Pode-se notar que o motor se encontrava desligado, uma vez que a temperatura estava abaixo de 20 °C. Alterando os parâmetros, o motor é instantaneamente ligado, pois o novo valor do *set-point* era inferior, desligando-se apenas quando a temperatura atingiu 2 °C e ligando novamente quando ela atingiu 4 °C, conforme projetado.

Figura 41 – Resposta à primeira alteração dos parâmetros de controle via comunicação serial USB



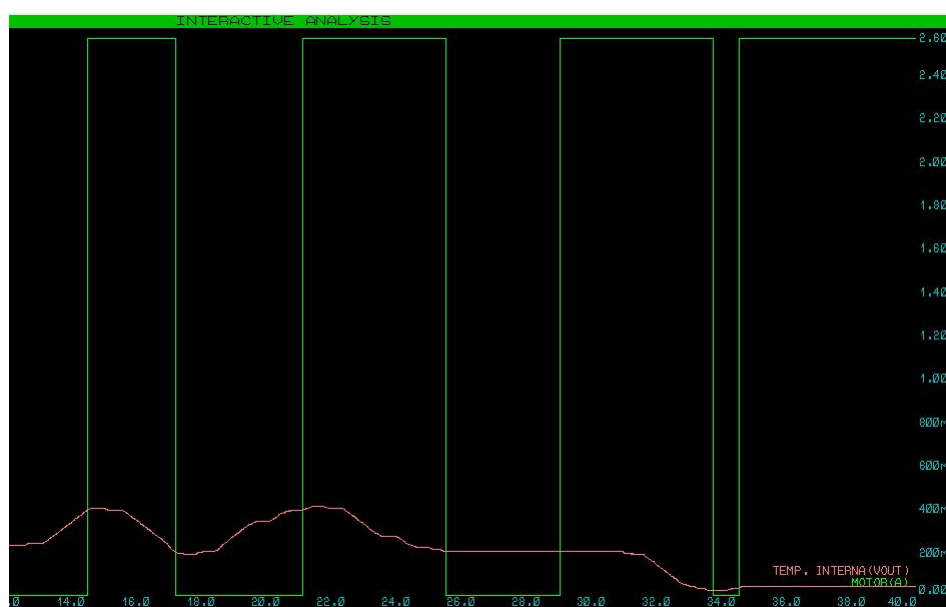
Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

Figura 42 – HID Terminal do MikroC para alteração dos parâmetros para $SP = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $H = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fonte: Gerada pelo *software* MikroC PRO v.7.2.0

Figura 43 – Resposta à segunda alteração dos parâmetros de controle via comunicação serial USB



Fonte: Gerada pelo *software* Proteus

4 Considerações finais

Este trabalho tratou da elaboração de uma estrutura de controle *on-off* de temperatura para um sistema de refrigeração com capacidade de alteração dos parâmetros de controle via alteração de *firmware* por meio da comunicação serial USB. Trata-se de uma estratégia de controle extremamente útil em virtude da facilidade proporcionada ao usuário para alteração dos parâmetros eliminando a dependência tecnológica do mesmo em relação ao desenvolvedor do código instalado no microcontrolador. Isto permite a redução de custos operacionais (valor que seria gasto para terceirização da atualização do *firmware*) bem como a redução do tempo de espera normalmente gasto com esta atividade.

Baseado no fato de que a grande maioria das famílias de compressores operam com velocidade constante, a estratégia de controle *on-off* se mostra necessária para adequar-se à natureza de operação dos compressores. Trata-se de uma estratégia de simples implementação em termos de programação e em termos práticos. Além disso, com o avanço do desenvolvimento dos sistemas embarcados, a estratégia aqui descrita possibilitou um sistema de controle prático e eficaz implementado no microcontrolador PIC, um dispositivo de custo relativamente baixo e de grande funcionalidade. Uma vantagem deste é a possibilidade de operação fácil com periféricos, dentre os quais se destacam a comunicação serial USB.

Na implementação do código de controle atentou-se para detecção de situações de falhas nos sensores ou atuadores do sistema, facilitando a tomada de decisão pelo usuário/operador, o que aumenta a independência tecnológica deste, além de contribuir para aumento da vida útil do sistema e a sua correta operação. Em situações de falhas, os modos de operação discutidos fornecem a detecção do tipo de falha por meio de sinais luminosos nos LED's, informação que pode ser facilmente compreendida. Um detalhe importante é que, se no decorrer da operação alguma falha nos sensores ou atuadores for detectada, o código é interrompido instantaneamente visando evitar danos ao sistema.

A instalação da resistência de degelo e uma lógica de controle para ativá-la mostrou-se um ponto forte deste projeto. Por meio dela, permite-se que o descongelamento seja realizado de forma automática, o que reduz o trabalho manual necessário durante a operação e contribui para o aumento da vida útil do refrigerador, uma vez que seu funcionamento é prejudicado nas situações onde a camada de gelo está muito espessa podendo, até mesmo, reduzir a eficiência do compressor.

Os resultados gráficos acima apresentados e discutidos mostraram a eficiência do sistema de controle proposto em todos os seus modos de operação. Nas situações de falhas simuladas houve a interrupção instantânea do código e os conjunto de LED's azul e

vermelho indicaram com extrema precisão o ponto de falha no sistema. Para a operação no modo controle, a lógica *on-off* desenvolvida mostrou-se em perfeita operação, permitindo com a variável de controle (temperatura) se mantivesse na faixa desejada.

Por fim, pôde-se perceber o funcionamento pleno do código de controle na situação na qual os parâmetros de controle são alterados com o sistema já em operação. Na presença de dados na porta serial do microcontrolador, o sistema realizou a leitura destes e, na sequência, permitiu a restauração do valor desejado da temperatura para os novos parâmetros escolhidos. Isto afirma a praticidade e eficiência do código aqui apresentado.

Como trabalhos futuros, a implementação prática em bancada desta estratégia pode ser desenvolvida buscando a análise de situações mais reais como a medição de temperatura por sensores ao invés da simulação de ondas conforme aqui realizado. Além disso, pode-se estudar a influência de atrasos de comunicação, frequência de *clock* do microcontrolador, tipos de sensores, dentre outras características inerentes à instrumentação eletrônica.

Referências

- ADAMOWSKI, J. C.; FURUKAWA, C. M.; COZMAN, F. G. Mecatrônica: uma abordagem voltada à automação industrial. **Mecatrônica atual**, v. 1, p. 8–11, 2001.
- AFUSO, S. K. **Controlador digital aplicado a robótica móvel embarcada**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- AGNOLETTO, E. J. **Análise dos tempos máximos de chaveamento dos modos de operação de um grupo gerador diesel após ilhamento**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015.
- AHANEKU, M. A.; CHUKWUNWIKE, N.; NAWWELU, U. N. Design and implementation of a microcontroller-based monitoring system for oil filled distribution transformer. 2019.
- ALMEIDA, C. R. O sistema haccp como instrumento para garantir a inocuidade dos alimentos. **Higiene Alimentar**, v. 12, n. 53, p. 12–20, 1998.
- ARAGONÉS, J. B. et al. Sensores de temperatura. **Recuperado el**, v. 3, p. 2003–04, 2003.
- BARROS, E.; CAVALCANTE, S. Introdução aos sistemas embarcados. **Grupo e Engenharia da Computação–GRECO, Centro de Informática–CIn, Universidade Federal de Pernambuco–UFPE**, 2003.
- BERNUY, M. A. C.; FILHO, A. V. Controle de temperatura utilizando microcontrolador pic. 2009.
- BRETAS, G. L. **Sistemas de controle de temperatura**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.
- BREWER, E. A. et al. Proteus: A high-performance parallel-architecture simulator. **ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review**, ACM New York, NY, USA, v. 20, n. 1, p. 247–248, 1992.
- BRITO, F. **Sensores e atuadores**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2014.
- CERA-MARTÍNEZ, D.; ORTIZ-SANDOVAL, J. E.; GUALDRÓN-GUERRERO, O. E. Sintonización de un controlador de temperatura a través de un autómata programable. **Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación**, v. 9, n. 1, p. 177–186, 2018.
- CHASE, O.; ALMEIDA, F. Sistemas embarcados. **Mídia Eletrônica. Página na internet**:< www.sbjovem.org/chase>, capturado em, v. 10, n. 11, p. 13, 2007.
- ÇINAR, S. M.; AKARSLAN, E. On the design of an intelligent battery charge controller for pv panels. **Journal of Engineering Science & Technology Review**, v. 5, n. 4, 2012.
- CRESPI, R.; CERON, T. A. **Sensor de temperatura LM35**. Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, p. 2, 2009.

- DANFOSS. **Velocidade variável**. 2019. Disponível em: <<https://www.danfoss.com/pt-br/markets/refrigeration-and-air-conditioning/dcs/variable-speed/#tab-overview>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**, 11a edição. **Rio de Janeiro, LTC**, 2009.
- DUAN, Y.; JIN, H. Digital controller design for switchmode power converters. In: IEEE. **APEC'99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1999 Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36285)**. [S.l.], 1999. v. 2, p. 967–973.
- DUARTE, B. P. **Controle de temperatura de um processo fotocatalítico com uso da plataforma arduino**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- EMBRACO. **20 anos de avanço na eficiência energética**. 2019. Disponível em: <<https://www.embraco.com/pt/20-anos-de-avanco-na-eficiencia-energetica/>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- EMBRACO. **Catálogo EMBRACO Linha de compressores-Distribuição e revenda**. 2020. Disponível em: <<https://www.embraco.com/wp-content/uploads/2020/03/1-2020-catalogo-portugues-am.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- ENGELOGIC. **Introdução aos Controladores Universais**. 2020. Disponível em: <<https://www.engelogic.com.br/download/controladores-universais.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- EVELIN, R. R. **Controle on/off através de periféricos que monitoram as variáveis temperatura e umidade para o melhor conforto térmico**. 2011.
- GRALIK, G.; BIAVA, G. Caracterização de termistores automotivos do tipo ntc. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 24, n. 4, 2019.
- HERMES, C. J. L. et al. **Desenvolvimento de modelos matemáticos para a simulação numérica de refrigeradores domésticos em regime transiente**. Florianópolis, SC, 2000.
- HERMES, C. J. L. et al. **Uma metodologia para a simulação transiente de refrigeradores domésticos**. Florianópolis, SC, 2006.
- INSTRUMENTS, T. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors**. Dalas, Texas, 2016.
- JESUS, J. et al. **Sistem de controle automático da temperatura do ar de secagem em secador de plantas medicinais**. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande**, v. 3, n. 1, p. 43–46, 2001.
- JUNIOR, J. M. F. **Síntese e caracterização elétrica de materiais com comportamento termistor à base de óxidos de manganês, de níquel de cobalto**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2007.
- LAGO, T. G. S. et al. **Estudo experimental e controle de um sistema de refrigeração com compressor de velocidade variável e válvula de expansão eletrônica**. [sn], 2016.

- LASSO, P. et al. Sistema de controle de temperatura para câmara de armazenamento de alimentos frescos em meio líquido. **Embrapa Instrumentação-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2003. 12 p., 2003.
- LEE, J. J. et al. **Monitoração remota via IP de sensores industriais**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- LEITE, J. C. S.; DRASZEWSKI, C. P.; ABAIDE, E. R. Controle de temperatura em tanque através de arduino baseado no controle on/off. In: **IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos-SIMPROC 2019**. [S.l.: s.n.], 2019.
- MARTINAZZO, C. A.; ORLANDO, T.; URI, E. da. **Comparação entre três tipos e sensores de temperatura em associação com arduino**. [S.l.]: PERSPECTIVA, Erechim, 2016.
- MARTINEZ, S. C. **Neurocontrolador de velocidade**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Santa Cecília, 2015.
- MATOS, J. H. R. **Equipamento de baixo custo para tratamento de icterícia neonatal com controle de posicionamento—Neofocus D**. 2016.
- MIRITZ, L. A. D. Programação de sistemas embarcados usando microcontroladores: um estudo de caso. 2016.
- MOREIRA, L. Medição de temperatura usando-se termopar. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 5, p. 51–53, 2002.
- NISE, N. S. Control system engineering, John Wiley & Sons. Inc, New York, 2011.
- NISE, N. S. Engenharia de sistemas de controle, 6ªed. LTC, São Paulo, 2012.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno. Tradução: Maya, Paulo Alvaro**. [S.l.]: São Paulo: Prentice-Hall, 2005.
- OLIVEIRA, A. L. d. L. Instrumentação—fundamentos de controle de processo—. **Vitória—ES. SENAI-ES**, 1999.
- OLIVEIRA, V. d. J. S.; THIESEN, E. R. Sistema embarcado para aplicação em monitoramento e controle de temperatura e umidade. 2018.
- OPPENHEIM, A. V. **Sinais e sistemas**. [S.l.]: Prentice-Hall, 2010.
- PARK, J.; PARK, A. J.; MACKAY, S. **Practical data acquisition for instrumentation and control systems**. [S.l.]: Newnes, 2003.
- PEREIRA, C. L. de O. Programação de microcontroladores para a comunicação com aplicações móveis usando bluetooth. 2020.
- PEREIRA, L. C.; GONÇALVES, R. S. Desenvolvimento de um sistema microcontrolado para controle de temperatura e aquecimento da água. 2014.
- PETRUZELLA, F. D. **Controladores lógicos programáveis**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.

- PIC MICROCONTROLLER. **Introdução aos Controladores Universais**. 2012. Disponível em: <<https://pic-microcontroller.com/pic18f2550-blink-led-using-xc8-compiler/>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- PIZZIOLO, T. A. **Análise de circuitos elétricos lineares no domínio da frequência**, 1^oed. **Appris, Curitiba**, 2018.
- PRATES, M. de O. et al. Controle da temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais. **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA-REVENG**, v. 19, n. 2, p. 101–111, 2011.
- REIS, C. **Sistemas operacionais para sistemas embarcados. Livro, 1^o Ed. Editora: EDUFBA, Brasil**, 2004.
- SANTOS, M. F. S. dos; MORENO, E. D. Mapeamento tecnológico e científico das aplicações de ações de controle em sistemas embarcados. In: **Congresso de Gestão, Negócios e Tecnologia da Informação—CONGENTI**. [S.l.: s.n.], 2019.
- SANTOS, T. d. S. et al. Desenvolvimento e aplicação de dispositivo eletrônico a partir de microcontrolador para controle de temperatura. In: **VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. [S.l.: s.n.], 2012.
- SEARS, F. W. et al. **Física 2, 12a Edição**. [S.l.]: Editora Pearson, 2008.
- SHIN, S. et al. Proteus: A flexible and fast software supported hardware logging approach for nvm. In: **Proceedings of the 50th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 178–190.
- SILVA, R. O. da; ARAUJO, W. M.; CAVALCANTE, M. M. Visão geral sobre microcontroladores e prototipagem com arduino. **TECNOLOGIAS EM PROJEÇÃO**, v. 10, n. 1, p. 36–46, 2019.
- SILVEIRA, A. V. D.; KAKUNO, E. M. Placa de aquisição de dados com pic18f2550. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 4, n. 2, 2012.
- SINCLAIR, I. **Sensors and transducers**. [S.l.]: Elsevier, 2000.
- SOUZA, A. M.; SAMOBYL, R. W.; MALAVÉ, C. O. Aplicação de um modelo paramétrico multivariado para o controle da temperatura de fornos de túnel. **Production, SciELO Brasil**, v. 14, n. 2, p. 82–94, 2004.
- SOUZA, G. A. d. et al. Estudo e implementação de uma estratégia inovativa para controle de temperatura. Florianópolis, SC., 2019.
- SOUZA, R. F. de. Caracterização do efeito seebeck em junções heterogêneas de óxido de cobre. **Encontro Internacional de Produção Científica—VIII EPCC, Cesumar, Maringá-Paraná-Brasil**, 2013.
- TAJIRI, L. L. Proposição de um controlador digital para conversores buck e boost usando a teoria de conjuntos aproximados. 2009.
- TEIXEIRA, E. H. C. G. et al. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. [S.l.]: Editora Blucher, 2010.

TONELLI, J. M. d. M. Monitoramento e controle de temperatura e umidade de ambientes. 2009.

WENDLING, M. Sensores. **Universidade Estadual Paulista. São Paulo**, v. 2010, p. 20, 2010.

WINCK, G. E. et al. Estudo e implementação de estratégias de controle para uma sorveteira comercial com foco em minimização do consumo energético. Florianópolis, SC., 2018.