

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

CAROLINE LAURA BAGATINI MIRANDA

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DIDÁTICO DE APLICAÇÃO DO PROTOCOLO
DE REDE MODBUS RTU PARA CONTROLE DE TEMPERATURA

Joinville
2024

CAROLINE LAURA BAGATINI MIRANDA

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DIDÁTICO DE APLICAÇÃO DO PROTOCOLO
DE REDE MODBUS RTU PARA CONTROLE DE TEMPERATURA

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Profa. Tatiana Renata Garcia

Joinville
2024

RESUMO

No campo industrial, a aplicação de protocolos de redes permite o gerenciamento da comunicação de dados entre os dispositivos da rede para monitoramento e controle de variáveis de processo dos sistemas industriais, item essencial para o desenvolvimento da automação industrial. Buscando levar experiências práticas com tecnologias industriais para o ambiente universitário, é indispensável introduzir a aplicação real de protocolos de rede no ambiente acadêmico, adotando conceitos utilizados na indústria para processos presentes no cotidiano acadêmico. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de aplicação do protocolo de rede industrial Modbus RTU para controle de temperatura de um ferro de solda, com fins didáticos, utilizando tecnologias presentes na indústria em uma aplicação comum acadêmica. Partindo do levantamento de requisitos de projeto, foi realizada a montagem de um painel didático permitindo a visualização dos componentes industriais do protótipo, implementado o software para comunicação entre os dispositivos da rede utilizando o protocolo Modbus RTU e desenvolvida a interface para leitura e escrita das variáveis de processo e supervisão do controle de temperatura em tempo real. O protótipo operou de forma coerente para leitura e escrita dos registradores dos escravos da rede e monitoramento do sistema, tornando viável sua utilização como uma ferramenta didática para auxiliar no ensino prático de redes industriais.

Palavras-chave: Protótipo didático. Modbus RTU. RS-485. Labview. Protocolo de rede.

ABSTRACT

In the industrial field, the application of network protocols enables the management of data communication between network devices for monitoring and controlling process variables in industrial systems, which is essential for the development of industrial automation. To bring practical experiences with industrial technologies into the university environment, it is crucial to introduce the real application of network protocols in academia, adopting concepts used in industry for processes encountered in everyday academic settings. In this context, this work presents the development of a prototype application of the Modbus RTU industrial network protocol for controlling the temperature of a soldering iron, for educational purposes, using technologies present in the industry in a common academic application. Starting from the project requirements survey, a didactic panel was assembled for visualizing the industrial components of the prototype, the software for communication between network devices using the Modbus RTU protocol was implemented, and an interface was developed for reading and writing process variables and supervising temperature control in real-time. The prototype operated effectively for reading and writing the network slaves' registers and system monitoring, making it a viable tool to support the practical teaching of industrial networks.

Keywords: Didactic prototype. Modbus RTU. RS-485. Labview. Network protocol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas do modelo OSI e TCP	13
Figura 2 – Funções das camadas do modelo OSI	14
Figura 3 – Pirâmide hierárquica dos níveis funcionais da automação	15
Figura 4 – Características gerais dos protocolos de rede industriais	16
Figura 5 – Topologias de rede	16
Figura 6 – Tipo de conexões entre nós da rede	17
Figura 7 – Fluxo de dados entre dispositivos da rede	17
Figura 8 – Transmissão de dados síncrona e assíncrona	18
Figura 9 – Modo de transmissão unicast na arquitetura mestre-escravo	20
Figura 10 – Modos de operação do protocolo RS-485	21
Figura 11 – Sinais diferenciais mínimos do protocolo RS-485	21
Figura 12 – Comprimento do cabo x taxa de dados do protocolo RS-485	22
Figura 13 – Camadas aplicadas aos protocolos Modbus	22
Figura 14 – Quadro de mensagens do protocolo Modbus RTU	23
Figura 15 – Códigos de funções do protocolo Modbus RTU	23
Figura 16 – Sequência de bits de um bloco de dados Modbus RTU	24
Figura 17 – Diagrama de transmissão de dados do protocolo Modbus RTU	25
Figura 18 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de temperatura genérico	26
Figura 19 – Sistemas de primeira ordem: diagrama de blocos e resposta ao degrau	27
Figura 20 – Diagrama de blocos controlador PID	27
Figura 21 – Sistemas de segunda ordem: diagrama de blocos e resposta ao degrau	28
Figura 22 – Controlador PID N1200	34
Figura 23 – Conexão de entrada para termopar	35
Figura 24 – Esquema elétrico do controlador PID N1200	37
Figura 25 – Display principal do controlador PID N1200	38
Figura 26 – Termopar tipo K	38
Figura 27 – Ferro de solda Hikari	39
Figura 28 – Contatora Metaltex 220Vca	39
Figura 29 – Esquema elétrico contatora Metaltex 220Vca	40
Figura 30 – Multimetro PowerNET M-200	40
Figura 31 – Conexões dos bornes do painel do multimetro M-200	41
Figura 32 – Sistema 01: 1P2W-1V1C monofásico (LN)	41
Figura 33 – Tela de menu de medições do multimetro M-200	42
Figura 34 – Conversor Novus USB-i485	43
Figura 35 – Conexões da rede do conversor Novus USB-i485	43

Figura 36 – Protótipo didático	45
Figura 37 – Presilha para suporte do multimedidor M-200	45
Figura 38 – Suporte do ferro de solda com o termopar fixo	46
Figura 39 – Esquema elétrico do protótipo	47
Figura 40 – Fluxograma da implementação do software	48
Figura 41 – Medição de sinais elétricos e temperatura do ferro de solda em malha aberta	50
Figura 42 – Escrita e leitura do parâmetro <i>SPLL</i> do controlador PID	53
Figura 43 – Alteração do setpoint do controlador PID	54
Figura 44 – Leitura dos registradores do multimedidor M-200	55
Figura 45 – Gráfico de temperatura x tempo do sistema durante o regime transitório	56
Figura 46 – Gráfico de temperatura x tempo do sistema durante o regime permanente	57
Figura 47 – Interface para ligar e desligar a comunicação entre o mestre e os dispositivos da rede	68
Figura 48 – Diagrama de blocos do mestre da rede Modbus RTU para comunicação com o escravo 1 (multimedidor M-200)	69
Figura 49 – Interface para alteração e escrita dos parâmetros do controlador PID	69
Figura 50 – Parâmetros lidos e escritos do controlador PID N1200	70
Figura 51 – Parâmetros lidos do multimedidor M-200	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sinais RS-485 do controlador PID N1200	35
Quadro 2 – Comandos de acesso de registradores pela rede Modbus	35
Quadro 3 – Modos de sintonia do controlador PID N1200	36
Quadro 4 – Equivalência de termos da comunicação serial	44
Quadro 5 – Códigos das funções do protocolo Modbus utilizadas para comunicação	49
Quadro 6 – Sinais elétricos e temperatura do ferro de solda em malha aberta .	50
Quadro 7 – Análise de cumprimento dos requisitos do projeto	56
Quadro 8 – Parâmetros de configuração rede do controlador PID N1200	66
Quadro 9 – Parâmetros de configuração de rede do multimedidor M-200	66
Quadro 10 – Configuração dos parâmetros de comunicação Modbus do mestre da rede	67
Quadro 11 – Parâmetros de configuração aplicados ao multimedidor M-200 . . .	67
Quadro 12 – Configuração dos parâmetros do controlador PID N1200	70
Quadro 13 – Quadro de registradores do controlador PID N1200	72
Quadro 14 – Quadro de registradores do multimedidor M-200	73

LISTA DE SÍMBOLOS

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CRC	Cyclic Redundancy Check
IHM	Interface Homem-máquina
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
NA	Normalmente Aberto
OSI	Open Systems Interconnection
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
RF	Requisito Funcional
RMS	Root Mean Square
RNF	Requisito Não Funcional
RTU	Remote Terminal Unit
TCP	Transport Control Protocol

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Protocolos de rede industriais	13
2.1.1	Características das redes industriais	15
2.1.2	Protocolo RS-485	20
2.1.3	Protocolo Modbus RTU	22
2.2	Sistemas SCADA	24
2.3	Controle PID	25
2.4	Sinais elétricos e medição de energia	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Definição dos Requisitos de Projeto	33
3.1.1	Requisitos funcionais	33
3.1.2	Requisitos não funcionais	33
3.2	Materiais	34
3.2.1	Controlador de temperatura	34
3.2.1.1	Termopar tipo K	38
3.2.1.2	Ferro de solda	38
3.2.1.3	Contatora	39
3.2.2	Multimedidor	40
3.2.3	Conversor RS-485-USB	42
3.2.4	Software Labview	42
3.3	Desenvolvimento do protótipo didático	44
3.3.1	Diagrama Elétrico	44
3.4	Implementação do Software SCADA	46
3.4.1	Comunicação Modbus RTU	46
3.4.2	Interface do Usuário	49
3.4.3	Medições e Testes	49
4	RESULTADOS	52
5	CONCLUSÕES	58

REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A	63
APÊNDICE B	66

1 INTRODUÇÃO

Protocolos de rede industriais são amplamente utilizados em plantas fabris e automação de máquinas e processos. Na prática, equipamentos industriais necessitam realizar a troca de dados para monitoramento, controle e configuração de parâmetros do sistema, garantindo segurança e qualidade do serviço ou produto final (DALE; STEPHEN, 2009).

Esses protocolos servem como padrão para o transporte eficiente dos dados, para garantir confiabilidade no fluxo de informações em tempo real (FOROUZAN et al., 2010). Além disso, permitem a integração de diferentes dispositivos que se comunicam na mesma rede, criando flexibilidade de hardware para adição e substituição de dispositivos no sistema de diferentes fabricantes (SHARMA, 2017).

O monitoramento de variáveis de processos industriais, como temperatura, tensão, velocidade, vazão, etc, é essencial para garantir a operação dentro dos limites requisitados. Nos sistemas de controle dos processos, os dados coletados por sensores são transmitidos de forma padronizada, através de protocolos de comunicação, até o dispositivo de controle, onde são tratados e uma resposta de controle é exercida sobre o sistema através de atuadores (SHARMA, 2017).

Para desenvolver aplicações em áreas como controle, monitoramento e simulação de processos, análise de dados, integração de sistemas e máquinas, interface para usuários, etc, são utilizados softwares de supervisão, como o Labview, tanto no meio industrial como no acadêmico (CANSALAR et al., 2015; MORAES; CASTRUCCI, 2007), oferecendo ferramentas para desenvolvimento de modelos para testes e aplicações de sistemas reais (KLEE; ALLEN, 2017).

Segundo Fiscarelli (2007), os materiais didáticos exercem um papel significativo na construção de conhecimento e desenvolvimento profissional. Devido ao acelerado crescimento do campo da automação industrial atualmente (SHARMA, 2017), torna-se necessário introduzir a aplicação prática de protocolos de rede no ambiente universitário, buscando adotar conceitos utilizados na indústria para desenvolver o interesse dos alunos e aproximá-los de aplicações reais por meio de experiências práticas.

Aplicações didáticas de redes industriais para controle de variáveis de processo vêm sendo desenvolvidas por pesquisadores brasileiros. Ramalho et al. (2011) desenvolveram uma metodologia de módulos didáticos utilizando o protocolo de rede Zigbee para motivar estudantes a se desenvolverem profissionalmente com a tecnologia, a partir de uma aplicação real de monitoramento remoto da temperatura ambiente do cerrado mato-grossense.

Cordeiro et al. (2018) aplicaram um estudo de práticas em laboratório para

a interação dos alunos com equipamentos industriais, focando em problemas de compatibilidade na comunicação entre equipamentos, como CLPs (Controlador Lógico Programável) e sensores, utilizando alguns protocolos de rede como Modbus RTU e Profibus, promovendo o estudo dos padrões de protocolos e aspectos da comunicação cabeada.

Visto a importância da adoção de métodos didáticos para o desenvolvimento profissional dos alunos e da utilização de redes industriais em sistemas para automação industrial, este projeto busca desenvolver uma aplicação da rede industrial Modbus RTU, devido a sua ampla utilização no meio industrial pela robustez e compatibilidade com diversos equipamentos (LRI AUTOMAÇÃO, 2023), para o controle e monitoramento de variáveis de processo de uma atividade comum no ambiente acadêmico dos alunos do curso de engenharia mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina.

A prática da soldagem eletrônica é uma atividade constantemente desenvolvida pelos alunos de engenharia mecatrônica durante a graduação, tanto em aulas de laboratório para o desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos, como em laboratórios de equipes de competição, onde realizam o desenvolvimento e manutenção de circuitos para aquisição de dados e controle e acionamento de motores de protótipos de carros, foguetes, barcos, etc. Com isso, foi considerado o desenvolvimento de um protótipo para controle de temperatura e monitoramento de sinais elétricos durante a utilização de um ferro de solda para este projeto.

Para o desenvolvimento do protótipo foram adquiridos componentes industriais para transmissão de dados na rede, realizada a montagem elétrica e mecânica de um painel com os equipamentos, feita a implementação do software do protocolo de rede e a interface para o usuário para monitoramento das variáveis de processo no software Labview, escolhido pela sua bagagem de ferramentas que atendem tanto aplicações acadêmicas quanto industriais. O protótipo operou de forma coerente para leitura e escrita dos registradores dos nós da rede e monitoramento do controle de temperatura do sistema em tempo real, tornando viável sua utilização como uma ferramenta didática para auxiliar no ensino prático de redes industriais.

1.1 OBJETIVOS

Para realizar a contribuição didática do aprendizado de protocolos de rede com aplicações industriais, propôs-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo de aplicação do protocolo de rede industrial Modbus RTU para controle de temperatura com fins didáticos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer os requisitos de projeto do sistema utilizando equipamentos comerciais industriais;
- Estudar os manuais dos componentes industriais e a rede Modbus RTU para a compreensão do funcionamento da comunicação e desenvolvimento do diagrama elétrico;
- Realizar a montagem mecânica e elétrica em um painel didático para visualização dos componentes;
- Implementar o software no Labview para comunicação entre os dispositivos da rede utilizando o protocolo Modbus RTU;
- Desenvolver uma interface no Labview para leitura e escrita dos parâmetros dos dispositivos da rede;
- Permitir o monitoramento do controle de temperatura em tempo real de uma aplicação acadêmica e a visualização das variáveis de processo pela interface.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

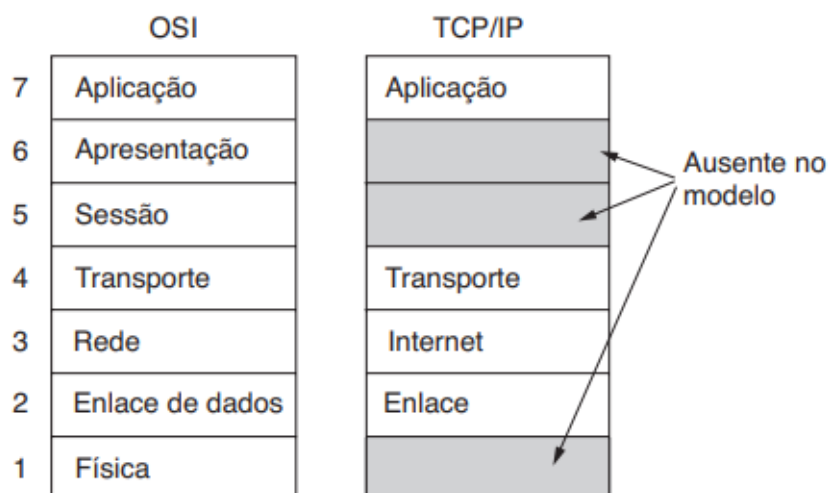
Este capítulo apresenta conceitos teóricos dos conteúdos relacionados à protocolos de rede industriais e suas características, com ênfase no protocolo Modbus RTU utilizando RS-485 no meio físico, controle PID e sinais elétricos para medição de energia. Tais conteúdos são essenciais para a compreensão das características da rede e desenvolvimento do protótipo didático.

2.1 PROTOCOLOS DE REDE INDUSTRIAIS

A transmissão de dados é gerenciada por protocolos padronizados aplicados em camadas para transformar os dados alfanuméricos de uma aplicação em sinais elétricos para serem enviados via cabo ou ondas eletromagnéticas, de forma que qualquer dispositivo possa se comunicar na rede no mesmo padrão, interpretando os dados transmitidos e recebidos da mesma forma (FOROUZAN et al., 2010).

No modelo de camadas, cada camada possui funções específicas que gerenciam cada parte da transmissão, podendo ser executada tanto em software quanto em hardware (TANENBAUM; WETHERALL, 2021). O modelo de camadas padrão da ISO (International Organization for Standardization) é conhecido como OSI (Open Systems Interconnection), e o modelo TCP/IP (Transport Control Protocol/Internet Protocol) é um modelo alternativo antecessor ao OSI (FOROUZAN et al., 2010), apresentados na Figura 1.

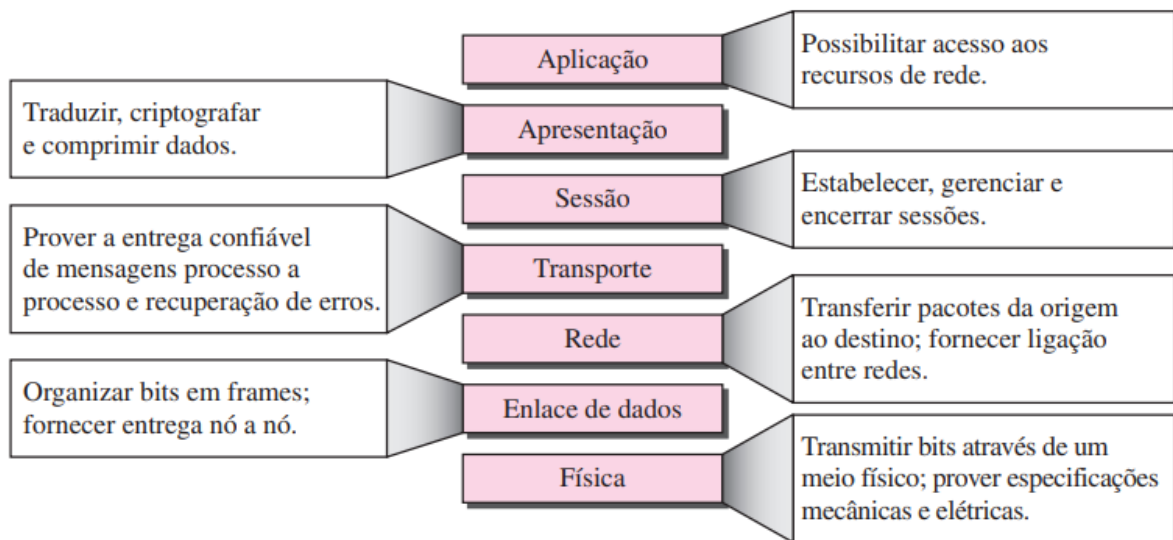
Figura 1 – Camadas do modelo OSI e TCP



Fonte: Tanenbaum e Wetherall (2021).

O primeiro modelo divide as funções de transmissão de dados em sete camadas enquanto o segundo em quatro, mas desempenhando serviços semelhantes para o encapsulamento e transporte de dados. A Figura 2 apresenta resumidamente as funções desempenhadas nas camadas do modelo OSI.

Figura 2 – Funções das camadas do modelo OSI



Fonte: Forouzan et al. (2010).

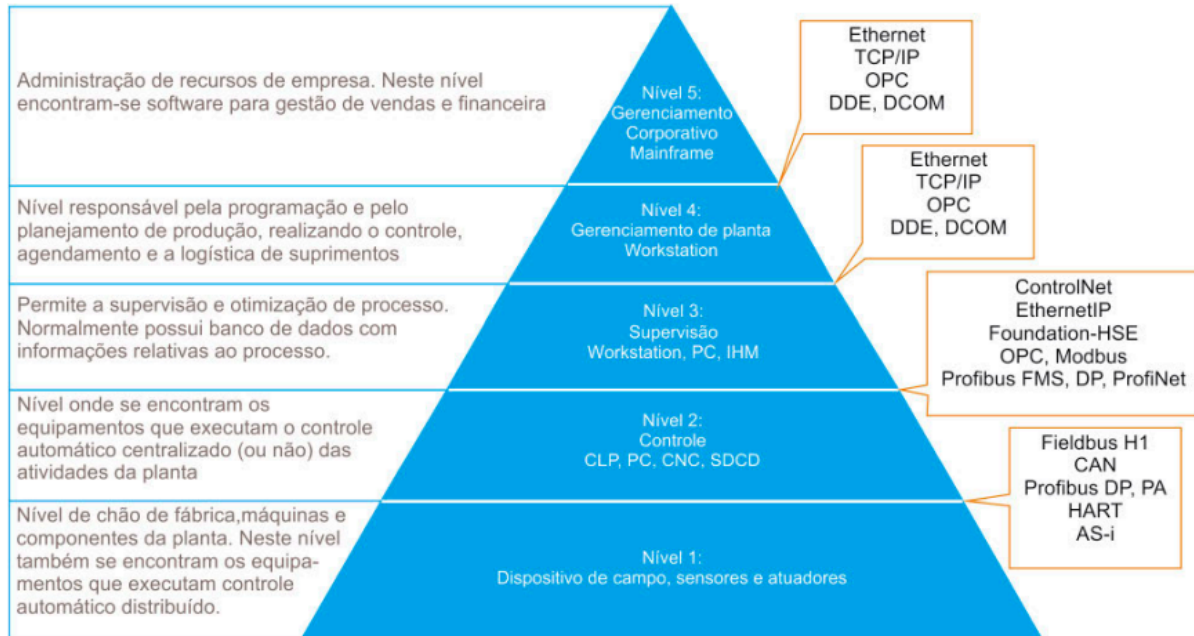
Para a transmissão dos dados pelas camadas, estes são encapsulados em pacotes com campos que identificam algumas informações para que o dispositivo receptor saiba como reorganizar os dados recebidos, que foram fragmentados em cada camada (FOROUZAN et al., 2010).

Os protocolos de rede industriais integram algumas ou todas essas camadas para realizar o controle de fluxo de dados, a formatação dos dados e a transmissão de forma padronizada e robusta no ambiente industrial, garantindo confiabilidade na comunicação, segurança do processo e flexibilidade no emprego de dispositivos de diferentes fabricantes comunicando através de um mesmo protocolo (SHARMA, 2017). Alguns desses protocolos são ProfiNet, EtherNet/IP, DeviceNet, CANopen, EtherCAT, Modbus (RTU/TCP), ASI interface, ControlNet, SensorBus, DeviceBus, FieldBus, ProfiBus (UNIVERSAL ROBOTS, 2022).

Segundo Cassiolato (2012), a escolha por um protocolo de rede industrial depende da necessidade do projeto, considerando fatores como velocidade de transmissão, distância entre os dispositivos da rede, número de dispositivos, complexidade, custo de instalação e manutenção, facilidade de expansão, redundância, e, além disso, do nível funcional hierárquico da pirâmide de automação no qual a aplicação está inserida. Os níveis funcionais e alguns dos protocolos de rede industriais

aplicados em cada nível são mostrados na pirâmide da Figura 3.

Figura 3 – Pirâmide hierárquica dos níveis funcionais da automação



Fonte: Cassiolato (2012).

Dessa forma, uma aplicação pode estar inserida em vários níveis e integrar diferentes protocolos de rede industriais para comunicação de dados (CASSIOLATO, 2012). Considerando aplicações de chão de fábrica com comunicação entre sensores, atuadores e sistemas de medição com controladores, e estes com o sistema supervisor/interface, esses sistemas estariam inseridos nos três níveis mais baixos da pirâmide de automação.

2.1.1 Características das redes industriais

As redes industriais apresentam algumas características que ditam seu modo de funcionamento em software, especificam o esquema de conexão físicas entre os dispositivos e influenciam no desempenho da rede (CASSIOLATO, 2012). Estas características são apresentadas na Figura 4.

A topologia física caracteriza a maneira como os dispositivos da rede estão fisicamente conectados entre si, na qual são chamados de nós ou estações da rede. O tipo de topologia utilizada depende da especificação do modo de operação, do protocolo de rede, do número de dispositivos comunicando, custo e complexidade (CASSIOLATO, 2012; SHARMA, 2017). A Figura 5 apresenta algumas configurações de topologias de rede.

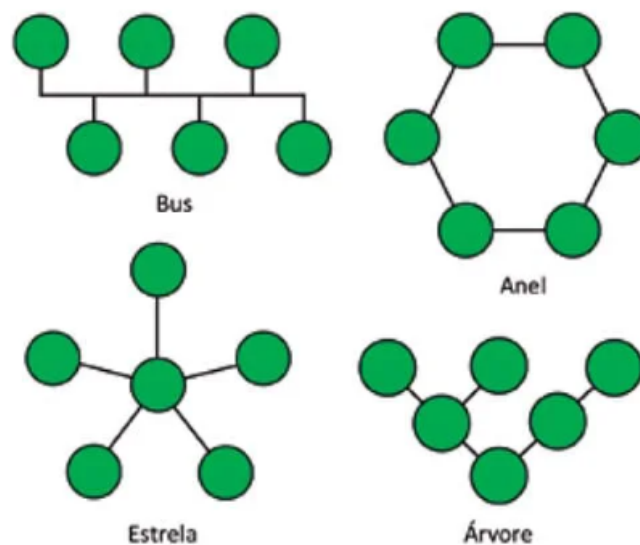
Na conexão ponto a ponto (peer-to-peer) há apenas um canal (link) dedicado

Figura 4 – Características gerais dos protocolos de rede industriais

Quanto a topologia física	. Barramento . Anel . Estrela . Árvore
Quanto ao tipo de conexão	. Ponto a ponto . Múltiplos pontos
Quanto ao modo de transmissão	. Transmissão serial . Transmissão paralela
Quanto à sincronização de bits	. Transmissão síncronica . Transmissão assíncronica
Quanto ao modo de operação	. Modo Simplex . Modo Half Duplex . Modo full Duplex

Fonte: Adaptado de Cassiolato (2012).

Figura 5 – Topologias de rede

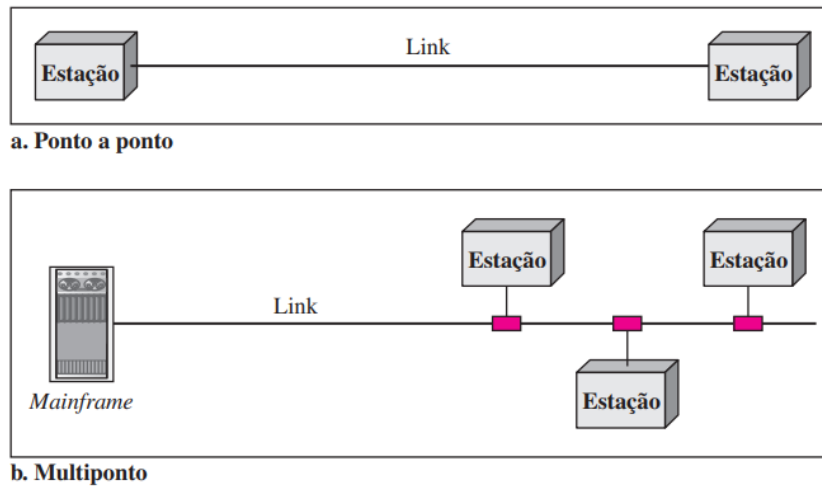


Fonte: Forouzan et al. (2010).

para a comunicação entre dois dispositivos (Figura 6), com toda a capacidade de transmissão disponível para eles. Na conexão multiponto (multidrop), mais de dois nós compartilham um único canal, com a capacidade de transmissão podendo ser compartilhada para utilização simultânea entre os diversos dispositivos da rede (compartilhamento espacial), ou com revezamento permitindo estabelecer apenas uma comunicação por vez (compartilhamento temporal) (FOROUZAN et al., 2010).

O modo de operação simplex permite apenas um tipo de operação no link, transmissão ou recepção. O modo half-duplex permite ambos os tipos de operação, mas apenas uma por vez no barramento, disponibilizando toda a capacidade de

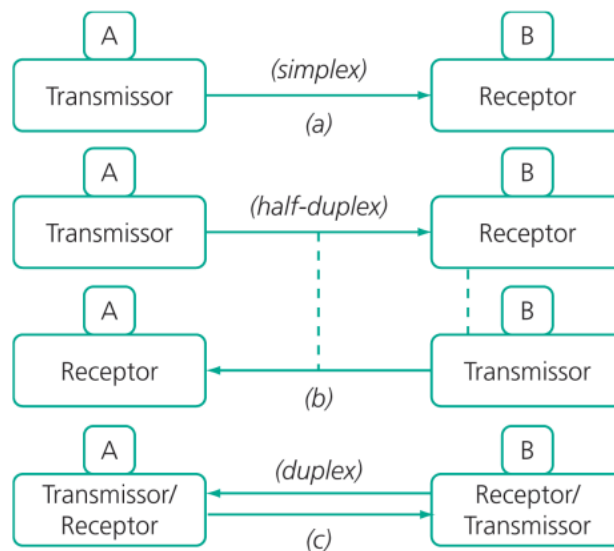
Figura 6 – Tipo de conexões entre nós da rede



Fonte: Forouzan et al. (2010).

transmissão de dados do canal para uma operação. No modo full-duplex (duplex) é possível transmitir e receber dados simultaneamente, em barramentos fisicamente distintos ou compartilhando o mesmo canal e, dessa maneira, a capacidade do canal para ambas as operações (ALENCAR, 2010). Os modos de operação são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Fluxo de dados entre dispositivos da rede



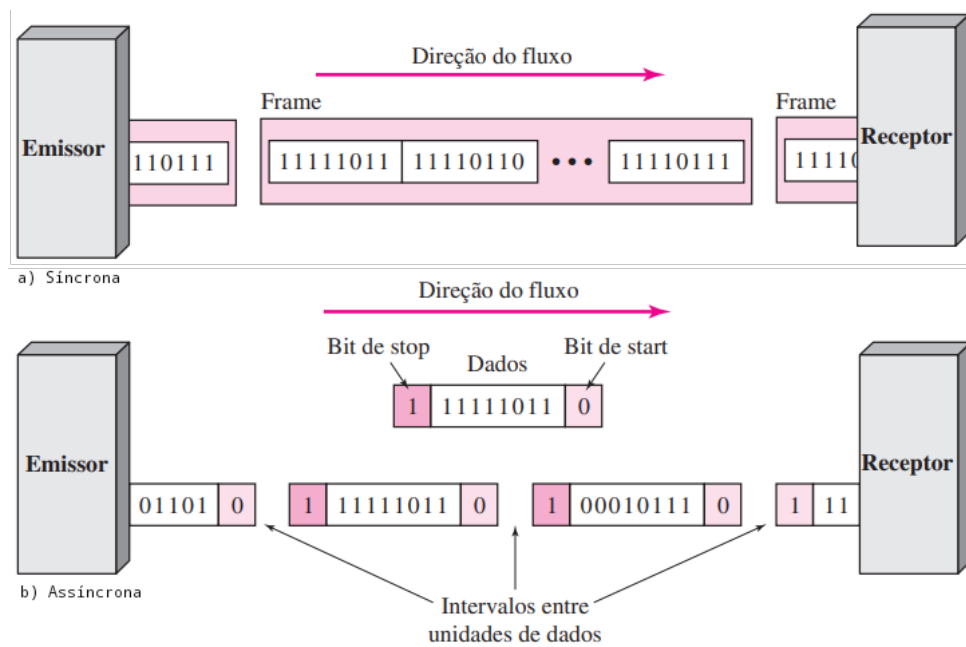
Fonte: Alencar (2010).

Para a transmissão dos sinais elétricos entre os dispositivos, o modo de transmissão serial utiliza um único cabo para transmitir um bit por vez. Já na transmissão paralela, os dados são transmitidos simultaneamente por cabos diferentes,

proporcionando maior velocidade, porém adicionando mais canais de sinais entre os nós da rede (FOROUZAN et al., 2010).

O fluxo de dados da transmissão serial pode ser síncrono ou assíncrono (Figura 8). Na transmissão assíncrona a temporização entre as mensagens não é relevante, portanto, são utilizados padrões no envio dos dados para ser possível separá-los e recuperá-los de maneira correta no receptor. Os dados geralmente são separados em blocos de bytes (8 bits) e adicionado bits no início (start bit) e no final (stop bit) de cada bloco de dados, não sendo necessário sincronismo entre os dispositivos para a transmissão dos blocos, apenas durante a transmissão dos bits de um bloco (FOROUZAN et al., 2010).

Figura 8 – Transmissão de dados síncrona e assíncrona



Fonte: Adaptado de Forouzan et al. (2010).

Na transmissão síncrona, os dispositivos transmissor e receptor utilizam intervalos de tempo bem definidos entre o envio dos blocos, transmitidos sequencialmente em conjuntos, deixando a separação dos dados como tarefa do receptor. Esse método não requer bits extras para separar os blocos, sendo, portanto, mais rápido que a transmissão assíncrona (FOROUZAN et al., 2010).

De acordo com Tanenbaum e Wetherall (2021), o meio físico da transmissão pode ser cabeado por par trançado, cabo coaxial e fibra ótica, ou sem fio (ondas de rádio, infravermelho e laser). A aplicação de cada meio depende de aspectos como largura de banda, taxa de transmissão (baud rate), latência (retardo), custo, ruído no canal, distância, instalação e manutenção, entre outros.

No meio físico cabeado, a transmissão dos bits é feita por sinais de tensão ou

corrente, que acabam perdendo parte da energia ou sofrendo interferências durante a transmissão, dessa forma, é necessário manter o sinal confiável o suficiente para conseguir ser reconstituído na sequência de bits correta no receptor (TANENBAUM; WETHERALL, 2021).

A largura de banda analógica do canal, em Hertz, é uma propriedade física do meio que depende das características como espessura, comprimento do cabo, entre outros, e está relacionada com a taxa de transmissão de dados da rede, limitando a quantidade máxima de informações que conseguem fluir pela conexão de rede durante um determinado período de tempo. A taxa de transmissão de dados também é referida como largura de banda digital ou capacidade de um canal C , em bits por segundo (bps) (FOROUZAN et al., 2010; TANENBAUM; WETHERALL, 2021).

Outra limitação da taxa de dados é a taxa de amostragem de sinais nos equipamentos. De acordo com o Teorema de Nyquist, para um sinal ser completamente reconstituído sem distorção, a taxa de amostragem do dispositivo receptor deve ser maior que o dobro da maior frequência B (Hz) contida no sinal. Considerando um sinal com V níveis discretos, sendo $V = 2$ para sinais binários (0 ou 1), e um canal ideal sem ruído (TANENBAUM; WETHERALL, 2021):

$$C = 2B \log_2 V \quad [bits/s] \quad (1)$$

Mais tarde, Claude Shannon aprofundou os estudos de Nyquist para um canal submetido a interferências conforme a razão sinal/ruído S/N (Signal/Noise), propondo que a capacidade de transmissão de um canal pode ser afetada conforme a relação (TANENBAUM; WETHERALL, 2021):

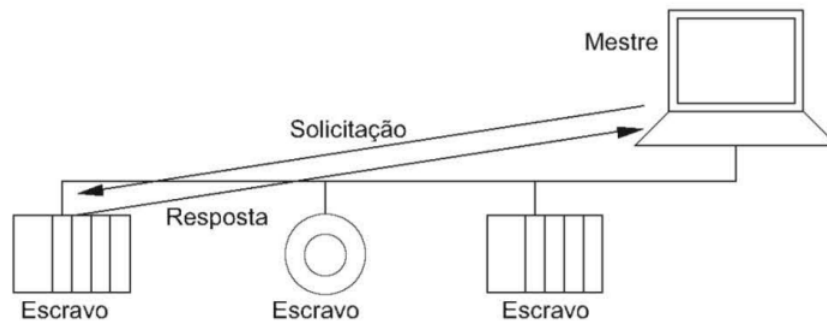
$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad [bits/s] \quad (2)$$

Dessa forma, além da largura de banda do meio físico e da interferência de ruídos no canal, um outro item que também influencia no desempenho da transmissão de dados da rede é o processamento interno dos dispositivos (FOROUZAN et al., 2010).

As arquiteturas mais comuns de comunicação entre os dispositivos são identificadas como mestre-escravo e cliente-servidor. Na arquitetura mestre-escravo, um ou mais dispositivos exercem o papel de mestre enquanto todos os outros são escravos na rede e somente o nó mestre comanda a comunicação, para um único escravo (unicast) (Figura 9) ou para todos ao mesmo tempo (broadcast). Os escravos são passivos, e após receberem informações do mestre, enviam informações como resposta apenas ao mestre, se necessário (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

A conexão entre cliente e servidor é controlada por requisições de conexão onde o cliente solicita informações ao servidor e este envia uma resposta, permitindo que os nós possam alternar entre os papéis de cliente ou servidor (SHARMA, 2017)

Figura 9 – Modo de transmissão unicast na arquitetura mestre-escravo



Fonte: Moraes e Castrucci (2007).

Essas nomenclaturas de arquiteturas vêm sendo utilizadas na área de redes e comunicação de dados por Modbus.org (2006), Moraes e Castrucci (2007), Thomas (2008), Tanenbaum e Wetherall (2021), Fagundes (2022), e serão utilizadas neste trabalho apenas para fins de analogia aos conceitos especificados nessa seção.

2.1.2 Protocolo RS-485

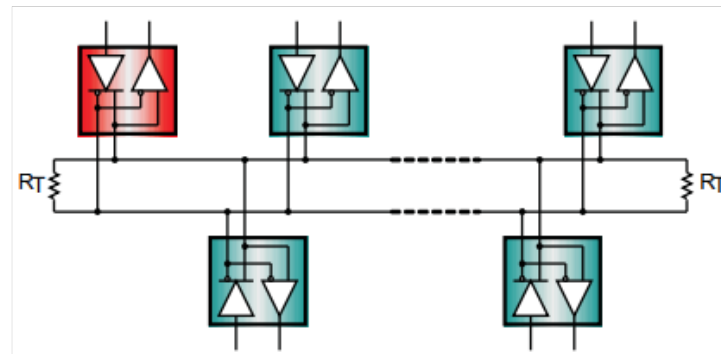
O protocolo RS-485 (Recommendad Standart-485), ou EIA-485 (Electronics Industries Association-485), é um padrão da camada física do modelo OSI que define características elétricas da transmissão de dados (KUGELSTADT, 2008; MODBUS.ORG, 2006), adequado para aplicações em redes de longa distância, em ambientes com ruído, e que possui suporte para alguns protocolos de rede industriais como Modbus RTU e Profibus (NOVUS, 2012).

Esse padrão permite a conexão de vários dispositivos na mesma rede cabeada (multiponto) em topologia barramento (bus), utilizando cabo tipo par trançado como meio físico para implementação da comunicação do tipo serial, podendo operar em modo de transmissão half-duplex, com dois cabos, ou full duplex, com quatro cabos (Figura 10), para distâncias de até 1200m (KUGELSTADT, 2008).

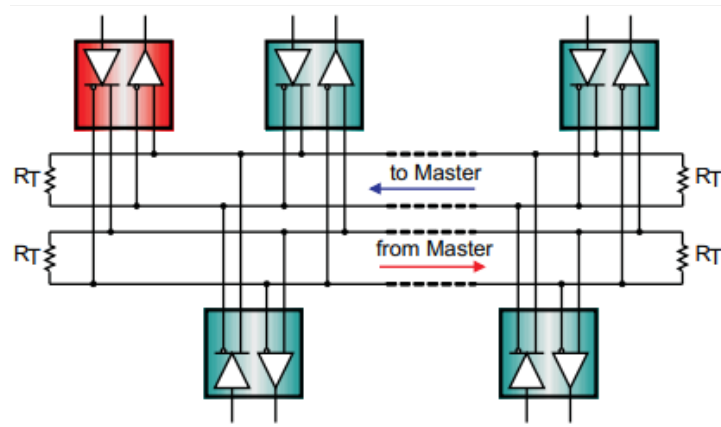
Além disso, esse padrão utiliza sinais diferenciais no par trançado, sendo um método eficiente para rejeição de ruídos que afetam ambos os fios como ruído de modo comum, garantindo robustez a interferências. O transmissor deve enviar um sinal diferencial de, no mínimo, 1,5 V de amplitude e o receptor deve detectar uma entrada diferencial de, no mínimo, 200 mV (Figura 11), garantindo confiabilidade na transmissão mesmo com ruído aplicado no canal (KUGELSTADT, 2008).

O comprimento e as perdas no barramento limitam a velocidade da transmissão de dados. A Figura 12 mostra o gráfico de relação entre o comprimento do cabo e a taxa de dados. Apesar do padrão estabelecer o limite de 10Mbps para a taxa de transmissão (baud rate), é possível alcançar até 40Mbps em determinadas aplicações (KUGELSTADT, 2008).

Figura 10 – Modos de operação do protocolo RS-485



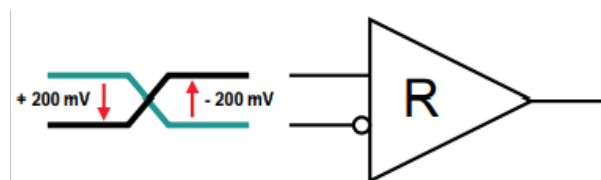
a) Half-duplex



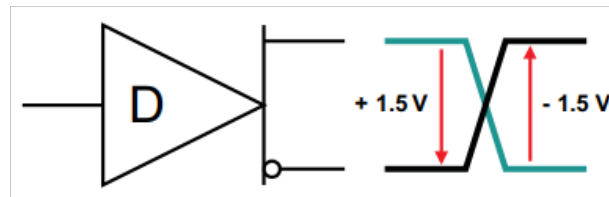
b) Full-Duplex

Fonte: Adaptado de Kugelstadt (2008).

Figura 11 – Sinais diferenciais mínimos do protocolo RS-485



a) Receptor

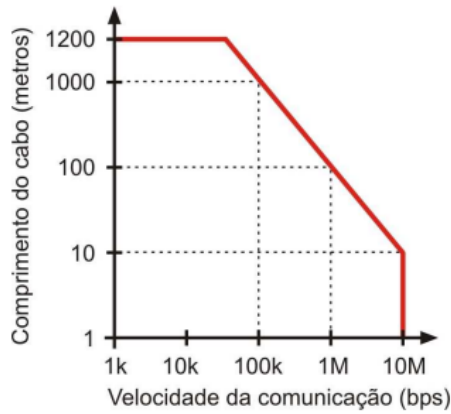


b) Transmissor

Fonte: Adaptado de Kugelstadt (2008).

O padrão também define um limite de 32 nós no barramento, porém é possível ultrapassar esse limite dependendo do protocolo de rede utilizado (KUGELSTADT, 2008). Além disso, recomenda-se a utilização de resistores de terminação com valor aproximado da impedância característica da linha de transmissão (aproximadamente 120 ohm para par trançado), contudo, para taxas de transmissão até 19,2kbps e

Figura 12 – Comprimento do cabo x taxa de dados do protocolo RS-485



Fonte: Novus (2012).

distâncias de até 100m, a rede consegue operar apropriadamente sem o emprego dos resistores (NOVUS, 2012).

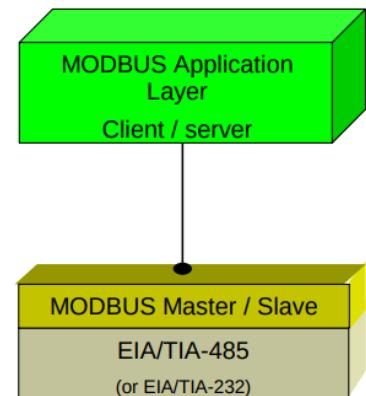
2.1.3 Protocolo Modbus RTU

O protocolo de rede industrial Modbus é um protocolo muito utilizado na área de automação industrial que opera nas duas camadas inferiores do modelo OSI (Modbus RTU e ASCII) e na camada de aplicação (Modbus TCP), conforme a Figura 13. O protocolo Modbus RTU (Remote Terminal Unit) é um dos modos de aplicação do Modbus para comunicação serial assíncrona entre os dispositivos da rede (THOMAS, 2008; MODBUS.ORG, 2006).

Esse modo utiliza a arquitetura mestre-escravo, no qual somente um mestre pode requisitar informações para os escravos (até 247 dispositivos), em modo unicast ou broadcast, e os escravos respondem apenas conforme solicitação do mestre (MODBUS.ORG, 2006; FAGUNDES, 2022).

Figura 13 – Camadas aplicadas aos protocolos Modbus

Layer	ISO/OSI Model	
7	Application	MODBUS Application Protocol
6	Presentation	Empty
5	Session	Empty
4	Transport	Empty
3	Network	Empty
2	Data Link	MODBUS Serial Line Protocol
1	Physical	EIA/TIA-485 (or EIA/TIA-232)

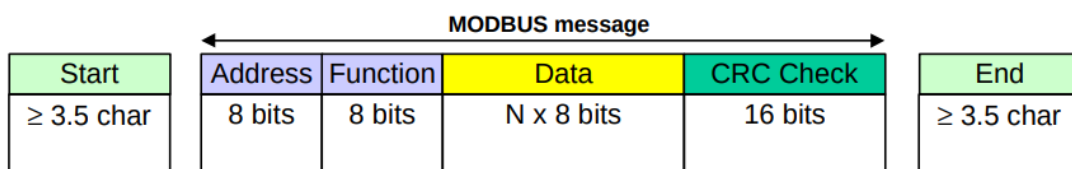


Fonte: Modbus.org (2006).

Na camada física do modelo OSI, esse protocolo utiliza interfaces seriais como RS-485, para conexão multiponto, e RS-232 para conexão ponto a ponto (MORAES; CASTRUCCI, 2007), que especificam os níveis de tensão dos sinais elétricos, a velocidade de transmissão, o número de dispositivos na rede e a distância entre eles (KUGELSTADT, 2008).

Na camada de enlace de dados, onde é feito o gerenciamento da transferência dos dados em quadros entre os dispositivos da rede, é realizada a identificação do início de um quadro (PDU - Protocol Data Unit) com um tempo de pausa mínimo de 3,5 caracteres (MODBUS.ORG, 2006). A Figura 14 mostra o quadro de dados do protocolo Modbus RTU.

Figura 14 – Quadro de mensagens do protocolo Modbus RTU



Fonte: Modbus.org (2006).

O endereço do equipamento escravo (address) pode ser representado por 0 no modo broadcast, ou pelo identificador de nó único do escravo (1 a 247). O tipo de operação Modbus a ser realizada é inserida no campo de código de função (function) do quadro (MODBUS.ORG, 2006). Os códigos das funções são apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Códigos de funções do protocolo Modbus RTU

Code	1/16-bit	Description
01	1-bit	Read coils
02	1-bit	Read contacts
05	1-bit	Write a single coil
15	1-bit	Write multiple coils
03	16-bit	Read holding registers
04	16-bit	Read input registers
06	16-bit	Write single register
16	16-bit	Write multiple registers
22	16-bit	Mask write register
23	16-bit	Read/write multiple registers
24	16-bit	Read FIFO queue

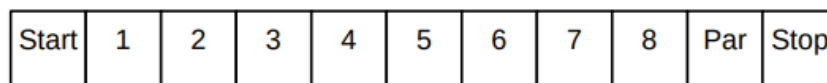
Fonte: Thomas (2008).

As memórias do tipo bobina (coil) são representados por 1 bit e os registradores

de holding e de input por 16 bits (word). Cada parte da memória é mapeada por um endereço que permite o acesso aos parâmetros e I/Os (entradas e saídas) do dispositivo escravo. Esse endereço deve ser especificado no campo de dados do quadro da mensagem (THOMAS, 2008).

No quadro de mensagem, o campo de dados (data) pode ter vários blocos de 8 bits, representados por dois caracteres hexadecimais de 4 bits, adicionando em cada bloco bits de start, stop e de paridade, se houver, ou dois stop bits se não houver um para paridade (Figura 16), permitindo até 256 bits de dados (MODBUS.ORG, 2006).

Figura 16 – Sequência de bits de um bloco de dados Modbus RTU



Fonte: Modbus.org (2006).

O bit de paridade, quando houver, é setado como 0 ou 1, a fim de manter a quantidade total de bits igual a 1 em cada bloco de dados de 8 bits com paridade par (even) ou ímpar (odd). O campo do CRC (Cyclic Redundancy Check) é empregado para a verificação de erros no quadro da mensagem pelo receptor, garantindo confiabilidade e integridade dos dados (MODBUS.ORG, 2006).

A Figura 17 apresenta o diagrama de funcionamento da transmissão de dados do protocolo Modbus RTU, tanto do escravo como do mestre.

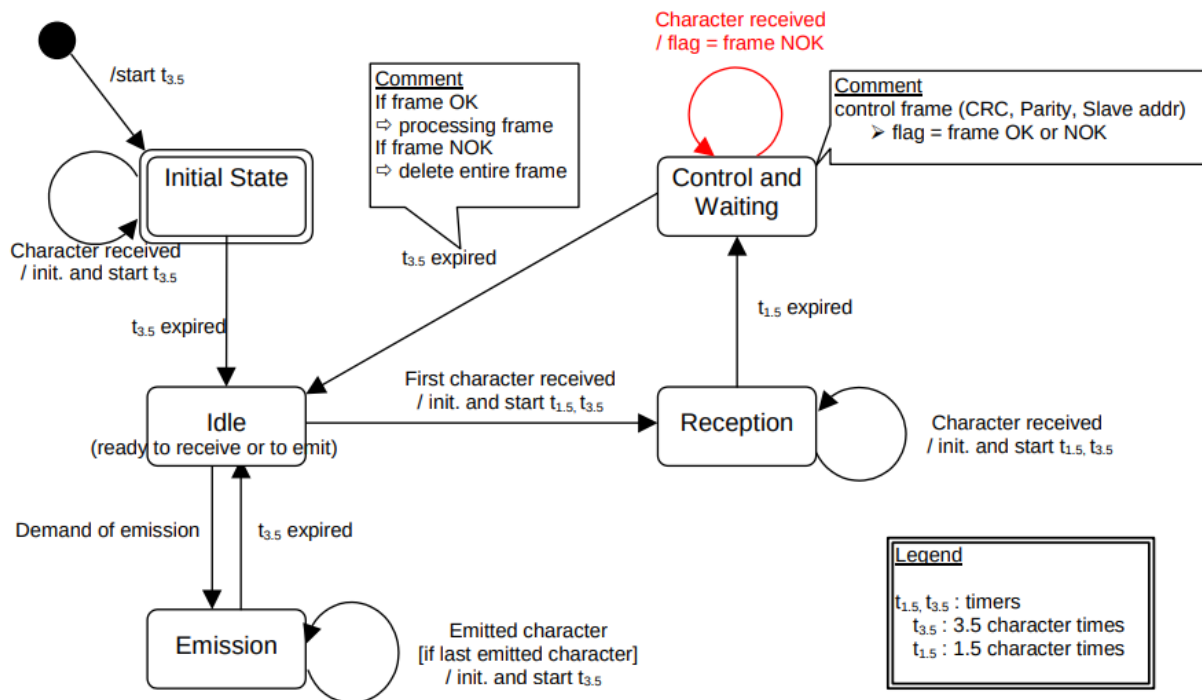
São utilizados os parâmetros de paridade, CRC, endereço do escravo e tempo de transmissão entre blocos de dados para controlar o recebimento e a autenticidade dos dados dos quadros no receptor, e apenas o tempo de transmissão para controlar o fluxo de envio de dados pelo transmissor (MODBUS.ORG, 2006).

2.2 SISTEMAS SCADA

Sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) são amplamente utilizados na automação industrial para supervisão, monitoramento, controle, aquisição e análise de dados de sistemas industriais. Geralmente são softwares desenvolvidos especificamente para o processo envolvido, com o uso de interfaces que permitem a interação do usuário com o sistema, de forma remota ou na própria planta (MORAES; CASTRUCCI, 2007; SCADA INTERNATIONAL, 2024).

Além da representação do fluxo do processo de forma visual, esses sistemas também são preparados para garantir a segurança dos processos e dos operadores, sendo comumente implementados sinais de controle de parada e reset do sistema e envio de sinais de automáticos de alertas de erros ou situações de risco (SCADA

Figura 17 – Diagrama de transmissão de dados do protocolo Modbus RTU



Fonte: Modbus.org (2006).

INTERNATIONAL, 2024).

2.3 CONTROLE PID

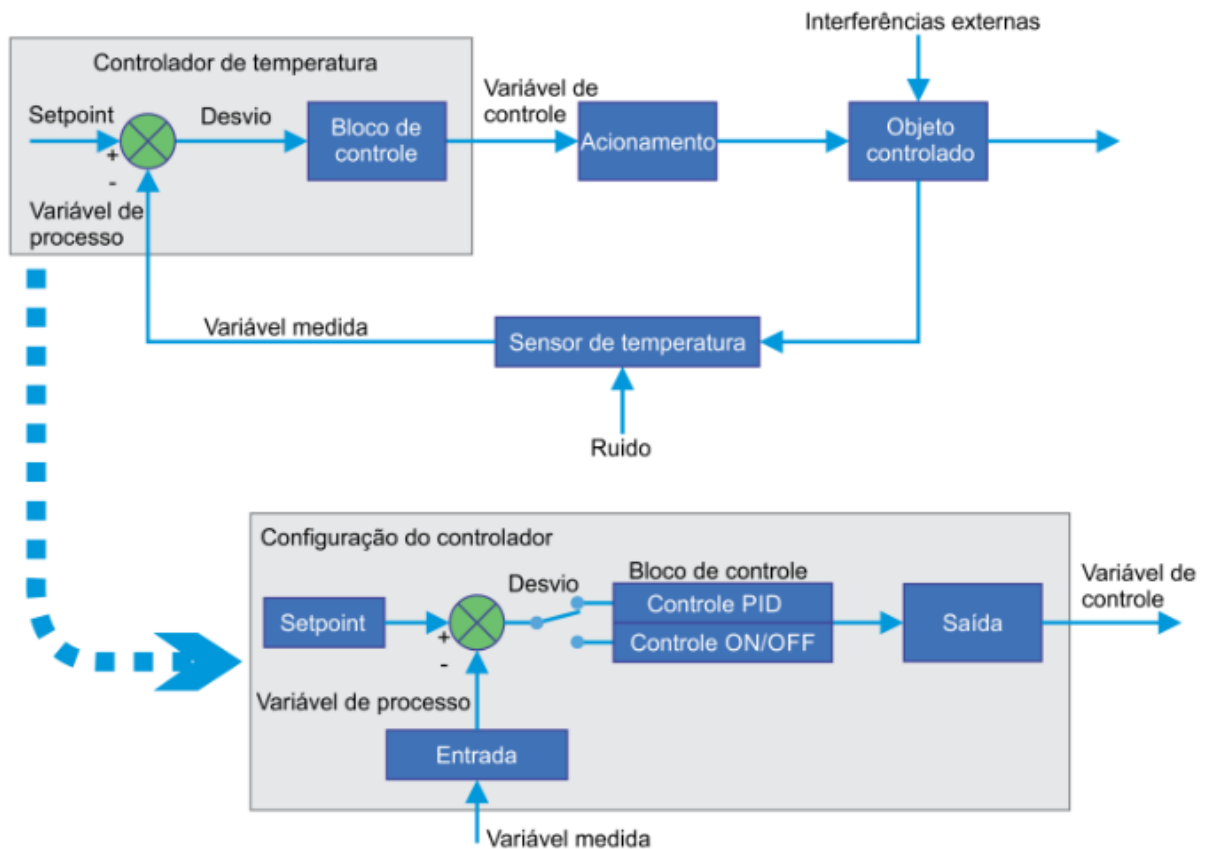
Os controladores industriais utilizam algoritmos e ações de controle para gerenciar o comportamento de sistemas e processos industriais, manter o desempenho desejado, dar estabilidade ao processo, adaptar o sistema a perturbações e atender especificações de segurança (BAYER; ARAUJO, 2011).

Os sistemas de controle podem ser aplicados em malha aberta ou malha fechada. O controle em malha fechada é aplicado para sistemas que podem sofrer distúrbios e alterações não previsíveis (OGATA, 2011). Nele utiliza-se a realimentação da resposta da saída da planta (sistema a ser controlado) para ajustar a ação de controle a partir do erro de desvio da saída do sistema em relação a referência desejada. Essa ação de controle são sinais determinados por algoritmos de processamento de dados dentro do controlador (BAYER; ARAUJO, 2011).

Um sistema simples de controle em malha fechada (Figura 18) possui um sensor para medir a variável de interesse (temperatura, distância, velocidade, nível), um controlador que determina a ação para manter a variável de interesse dentro do limite de referência (setpoint) informado, e um atuador que recebe a ação de controle para atuar sobre a planta (SHARMA, 2017).

Sistemas representados por equações diferenciais lineares podem ser

Figura 18 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de temperatura genérico



Fonte: AlfaCOMP (2022).

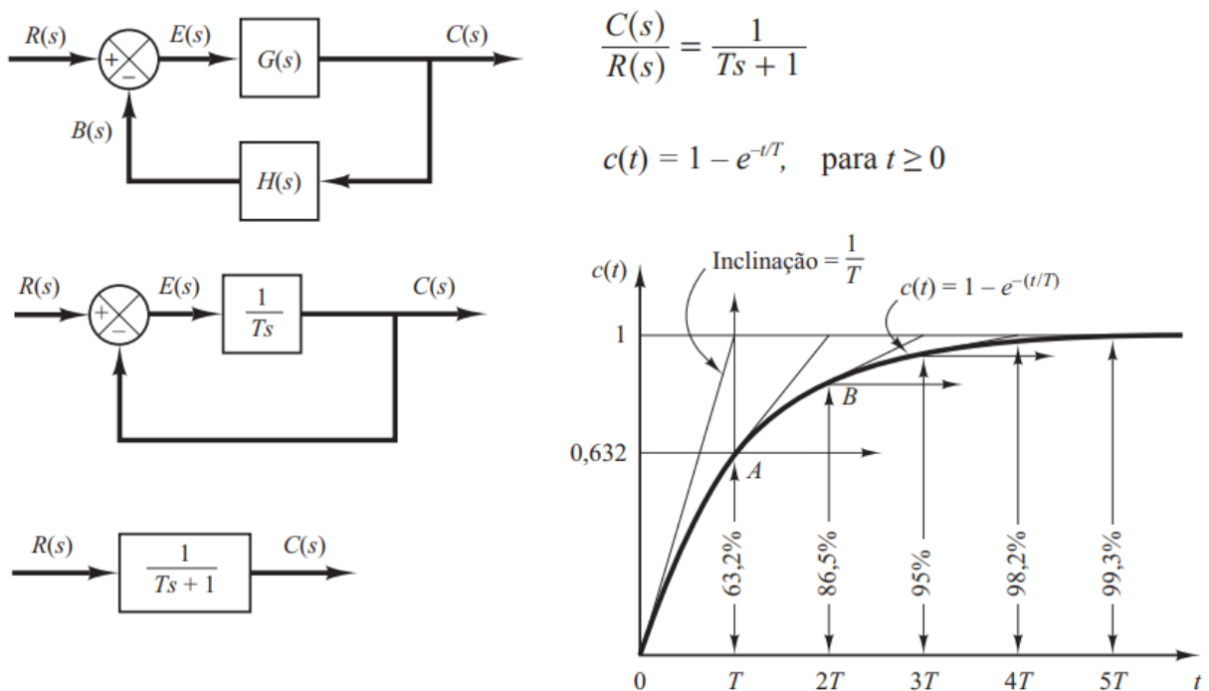
modelados matematicamente em forma de função de transferência, representando a relação entre a entrada e a saída do sistema, ou de uma parte dele, para simulação e análise do gráfico de resposta da saída no tempo ao aplicar uma função de teste na entrada, podendo ser degrau, rampa, senoidal, entre outras, e assim, determinar o melhor ajuste para o controle do sistema (OGATA, 2011).

Os sistemas térmicos são modelados como sistemas de primeira ordem, apresentando resposta a uma entrada em degrau como uma função exponencial, conforme a Figura 19, em que $G(s)$ representa o controlador e a planta, $H(s)$ o sensor, $R(s)$ a entrada de referência do sistema e a saída $C(s)$.

As ações básicas de controle encontradas em controladores comerciais são o controle P (proporcional), I (integral), D (derivativo), ou a combinação deles, e o controle ON/OFF. O controle ON/OFF pode ser representado pelo acionamento de uma chave. Se o erro entre a referência (setpoint) e a variável medida for positivo, a chave é mantida ligada, e se for negativo, ou seja, se o valor medido for maior que a referência, a chave é desligada (BAYER; ARAUJO, 2011).

O controle PID é um tipo de controle em malha fechada muito aplicado em plantas industriais, combinando o controle proporcional, integral e derivativo, para ajustar a ação de controle e melhorar a estabilidade e a resposta dinâmica e permanente

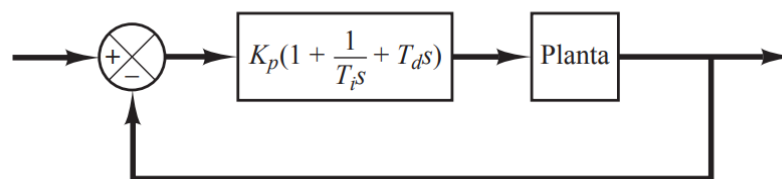
Figura 19 – Sistemas de primeira ordem: diagrama de blocos e resposta ao degrau



Fonte: Adaptado de Ogata (2011).

do sistema (BAYER; ARAUJO, 2011). O diagrama de blocos do controlador PID é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama de blocos controlador PID



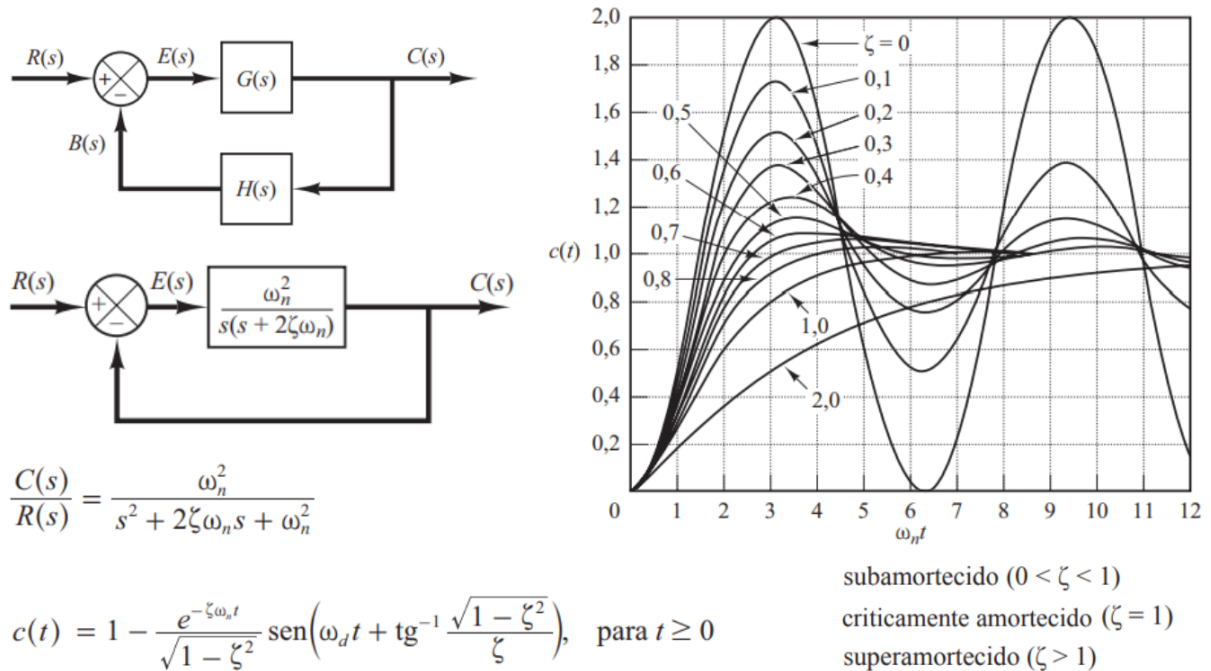
Fonte: Ogata (2011).

O termo proporcional atua na ação de controle de forma proporcional ao erro atual entre o valor de referência e o valor medido, ajudando a evitar oscilações da saída no regime permanente (SHARMA, 2017).

O termo derivativo atua somente quando há variação no erro, sendo proporcional a sua taxa de variação, atuando de forma a diminuir a oscilação em torno da referência, porém, deixa a resposta mais lenta. O termo integral atua na correção do valor do erro estacionário ao longo do tempo, mas deixa o sistema mais oscilatório (BAYER; ARAUJO, 2011).

Sendo uma função de transferência de segunda ordem, o controlador PID apresenta resposta com características da Figura 21, com amplitude de oscilação dependente do coeficiente de amortecimento ζ (BAYER; ARAUJO, 2011).

Figura 21 – Sistemas de segunda ordem: diagrama de blocos e resposta ao degrau



Fonte: Adaptado de Ogata (2011).

Para o ajuste correto dos três parâmetros PID, K_p (ganho proporcional), T_i (tempo integral) e T_d (tempo derivativo) de um controlador, existem alguns métodos como o método de Ziegler-Nichols, que consiste em ir aumentando o ganho proporcional até a saída do sistema oscilar, obtendo assim o ganho crítico e o período crítico de oscilação do sistema, e, a partir desses valores, utilizar as equações de ajuste para encontrar os parâmetros. Ou ainda utilizando métodos de software com algoritmos de otimização para sintonia dos parâmetros de forma automática, comumente encontrado como funções integradas em controladores comerciais industriais (BAYER; ARAUJO, 2011).

A adição de um controlador PID em malha fechada aumenta a ordem da planta original, contudo, a resposta de saída do sistema ao degrau dependerá da dominância dos polos da função de transferência do sistema em malha fechada e, desse modo, dos valores de sintonia dos parâmetros PID (OGATA, 2011).

Nos controladores comerciais o controle PID é implementado de forma digital e o sinal de controle é executado na saída do controlador de diferentes maneiras, como com acionamento por relé (eletromecânico ou de estado sólido) e por pulso digital (PWM - Pulse Width Modulation) (NOVUS, 2021a). O primeiro é mais utilizado em

aplicações em que a precisão não é um fator tão relevante e ciclos de chaveamentos não causem muitas interferências, e o segundo quando é necessário uma resposta rápida e precisa (INETEC, 2023).

A saída de controle por relé atua de maneira a realizar o chaveamento dependendo do valor do sinal de controle PID, ativando o relé quando há um aumento da saída de controle e desligando quando o valor de saída diminui, com um valor de faixa de histerese que limita uma faixa onde não ocorre o chaveamento a fim de reduzir ruídos de comutação e o desgaste mecânico dos relés eletromecânicos (FONSECA, 2017).

Utilizando a saída PWM, o controlador ajusta a largura do pulso (duty cycle) de acordo com o sinal de ação do controle PID para o controle da média de potência que é fornecida à carga (FONSECA, 2017). Visto que sistemas de controle térmico apresentam resposta de saída lenta, é suficiente a utilização da saída com acionamento por relé nesse tipo de aplicação.

2.4 SINAIS ELÉTRICOS E MEDIÇÃO DE ENERGIA

A tensão da rede elétrica, disponibilizada nas tomadas residenciais e industriais, representa a diferença de potencial entre dois pontos, podendo ser tensão de fase (fase-neutro) ou tensão de linha (fase-fase) (SADIKU; ALEXANDER, 2013). A tensão da rede varia no tempo com formato senoidal com frequência geralmente de 60 ou 50 Hz, representada pela Equação (3):

$$v(t) = V_p \cos(2\pi ft + \phi_v) \quad [V] \quad (3)$$

onde f é a frequência da senóide, ϕ_v é a fase e V_p a amplitude ou valor de pico.

A partir do momento que é conectada uma carga na tomada, um circuito é fechado, criando um fluxo de deslocamento de cargas elétricas, gerando corrente elétrica (A). Essa corrente apresenta a mesma forma de onda senoidal de mesma frequência da tensão (SADIKU; ALEXANDER, 2013),

$$i(t) = I_p \cos(2\pi ft + \phi_i) \quad [A] \quad (4)$$

onde ϕ_i é a fase e I_p a amplitude ou valor de pico.

Dependendo das características resistiva (R) e reativa (indutiva L e capacitiva C), da carga, a corrente pode apresentar ou não deslocamento de fase com relação a tensão. Para cargas puramente resistivas, a corrente está em fase com a tensão (SADIKU; ALEXANDER, 2013).

A impedância (Z) de uma carga conectada a um circuito CA representa, assim como a Lei de Ohm para cargas resistivas em circuitos de corrente contínua (CC), a oposição da carga ao fluxo de corrente, sendo a razão entre os valores de tensão e corrente elétrica sobre a carga. Ela possui uma parte real, equivalente à resistência R ,

que representa a característica resistiva da carga, e uma parte imaginária de reatância X , que representa a característica reativa da carga (SADIKU; ALEXANDER, 2013):

$$\begin{aligned} Z &= R + jX \\ &= \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \cos(\phi_v - \phi_i) + j \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \sin(\phi_v - \phi_i) \quad [\Omega] \end{aligned} \quad (5)$$

A rede elétrica apresenta padrão de tensão alternada (CA) de 127Vca ou 220Vca para sistemas monofásicos, e 220Vca e 380Vca para sistemas trifásicos, dependendo da região. Esses valores são representados em termos do valor RMS para medidores comerciais, não em valor de pico (SADIKU; ALEXANDER, 2013).

O valor eficaz, ou RMS (Root Mean Square), de um sinal senoidal, como o de corrente ou tensão CA, corresponde ao valor CC do sinal que fornece o mesmo valor de potência média para uma carga puramente resistiva, sendo igual a raiz quadrada da média do sinal ao quadrado. Assim, o valor RMS de uma constante é o próprio valor da constante (SADIKU; ALEXANDER, 2013).

$$\begin{aligned} V_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \\ &= \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad [V_{RMS}] \end{aligned} \quad (6)$$

A potência instantânea da carga corresponde a um valor variante no tempo que indica velocidade com que a energia é consumida pela carga, podendo ser calculada como o produto da tensão pela corrente elétrica,

$$p(t) = v(t)i(t) \quad [W] \quad (7)$$

enquanto a potência média corresponde a média da potência instantânea ao longo de um período de tempo T (SADIKU; ALEXANDER, 2013):

$$\begin{aligned} P_{med} &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\ &= \frac{1}{2} V_p I_p \cos(\phi_v - \phi_i) \\ &= V_{RMS} I_{RMS} \cos(\phi_v - \phi_i) \quad [W] \end{aligned} \quad (8)$$

onde I_p corresponde à corrente de pico e ϕ_i o deslocamento de fase da corrente $i(t)$. O produto dos termos RMS correspondem a potência aparente S :

$$S = V_{RMS} I_{RMS} [VA] \quad (9)$$

e o termo cosseno corresponde ao fator de potência, que indica a diferença fasorial entre corrente e tensão:

$$FP = \cos(\phi_v - \phi_i) \quad (10)$$

Também existe a potência complexa, que pode ser representada em termos de números complexos com um termo real, que corresponde a potencia ativa P , e um termo imaginário, que corresponde a potência reativa Q :

$$S = P + jQ \quad (11)$$

A potência ativa P corresponde a potência média dissipada pela carga:

$$\begin{aligned} P &= I_{RMS}^2 R \\ &= V_{RMS} I_{RMS} \cos(\phi_v - \phi_i) \quad [W] \end{aligned} \quad (12)$$

A potencia reativa representa a troca de energia entre a fonte e a parte reativa da carga:

$$\begin{aligned} Q &= I_{RMS}^2 X \\ &= V_{RMS} I_{RMS} \sin(\phi_v - \phi_i) \quad [VAr] \end{aligned} \quad (13)$$

Segundo Sadiku e Alexander (2013), potência média ou ativa positiva indica que a carga absorve potência do circuito e potência negativa indica que a carga transfere energia para a fonte. Já a potência reativa positiva indica que a fase da senoide corrente está atrasada em relação à tensão, ou seja, fator de potência atrasado consome potência reativa, característica de cargas indutivas, e quando negativa, a corrente tem fase adiantada em relação à tensão, ou seja, a carga possui característica capacitiva.

Dessa forma, cargas resistivas tendem a absorver energia do sistema, apresentando potência ativa positiva e reativa nula, enquanto cargas puramente reativas (L ou C) não absorvem potência média. A potência media para cargas puramente resistivas é apresentada na Equação 15:

$$\begin{aligned} P_{med} &= S \\ &= V_{RMS} I_{RMS} \\ &= I_{RMS}^2 R \\ &= \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad [W] \end{aligned} \quad (14)$$

para as quais o fator de potência é igual a 1.

A energia absorvida ou fornecida por uma carga num determinado período de tempo é representada por:

$$e(t) = \int_0^T p(t) dt \quad [J] \quad (15)$$

sendo que 3600 J correspondem a 1Wh.

Sistemas de medição de energia são utilizados para monitorar o consumo de energia em indústrias, residências e outros estabelecimentos. Eles fornecem dados que

permitem a análise do consumo para calcular custos, reduzir desperdícios e aumentar a eficiência energética (IFELL, 2023).

Para realizar a medição geralmente são utilizados medidores eletrônicos que fornecem dados do consumo em tempo real em kWh, utilizando componentes como sensores e transdutores de corrente e tensão para obter as grandezas elétricas e calcular o consumo em kWh (IFELL, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a evolução do desenvolvimento do projeto do protótipo didático, partindo do levantamento de requisitos, estudo dos componentes industriais, montagem mecânica e elétrica de um painel didático, implementação do software para comunicação pelo protocolo de rede Modbus RTU utilizando o Labview, e, por fim, a implementação da interface do usuário.

3.1 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DE PROJETO

Para mapear os objetivos e funcionalidades de um sistema no desenvolvimento de um projeto, são utilizados os requisitos funcionais, aqueles que descrevem as funcionalidades específicas do sistema, e não funcionais, relacionados à características, restrições e especificações que devem ser atendidas em termos de desempenho, usabilidade, tecnologias envolvidas, etc (SOMMERVILLE, 2011). Dessa forma, foram levantados inicialmente os requisitos funcionais (RF) e não funcionais (RNF) para guiar o desenvolvimento do protótipo e atender os objetivos desejados com este trabalho.

3.1.1 Requisitos funcionais

Os requisitos funcionais são listados abaixo.

- RF1 Utilizar itens comerciais industriais;
- RF2 Implementar o protocolo de rede Modbus RTU para comunicação entre os equipamentos;
- RF3 Realizar o ajuste dos parâmetros para o controle de temperatura pela rede;
- RF4 Permitir a visualização didática dos componentes e da rede;
- RF5 Disponibilizar uma interface para o usuário.

3.1.2 Requisitos não funcionais

Os requisitos não funcionais são listados abaixo.

- RNF1 Utilizar dois módulos escravos na rede Modbus, um medidor de energia e um controlador de temperatura;
- RNF2 Empregar um ferro de solda como equipamento para o controle de temperatura;
- RNF3 Realizar a montagem dos componentes em um painel;
- RNF4 Implementar a comunicação Modbus e a interface gráfica no software Labview;

- RNF5 Permitir o monitoramento do controle de temperatura, a visualização dos parâmetros da rede e dos sinais elétricos pela interface.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento do protótipo são apresentados a seguir.

3.2.1 Controlador de temperatura

A Figura 22 mostra o controlador PID N1200 utilizado para o controle de temperatura do projeto. Este é um controlador universal que abrange muitos dos tipos de sensores e sinais utilizados na indústria e possibilita saídas de controle do tipo relé, 4-20 mA e pulso digital (PWM), adequados para diversos tipos de processos industriais, além de possuir auto-tune dos parâmetros PID (NOVUS, 2021a).

Figura 22 – Controlador PID N1200



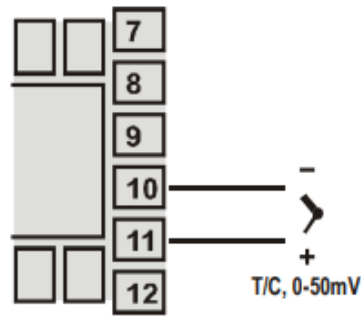
Fonte: NOVUS (2021a).

O tipo de sensor de entrada utilizado é definido na configuração do dispositivo, no parâmetro *Type*, sendo que as opções compatíveis com o controlador já possuem calibração de fábrica conforme norma NBR 12771/99 (NOVUS, 2021a). Neste projeto, foi optado pelo uso do termopar tipo K. A conexão de entrada para termopar (T/C) e sua respectiva polaridade é apresentada na Figura 23.

O protocolo de rede de comunicação suportado pelo dispositivo é o Modbus RTU e o protocolo da interface de comunicação serial suportada é o RS-485, em modo half-duplex (2 cabos), permitindo até 247 dispositivos em rede e distância de ligação máxima de 1000m (NOVUS, 2021a). A identificação dos sinais da comunicação serial do controlador é mostrado no Quadro 1.

A quantidade de bits de dados do quadro de mensagem é, por padrão, 8 bits (1 byte), já o número de bits de parada (stop bits) é reconhecido pelo controlador,

Figura 23 – Conexão de entrada para termopar



Fonte: NOVUS (2021a).

Quadro 1 – Sinais RS-485 do controlador PID N1200

Identificação	Descrição
D1	Linha bidirecional de dados
D0	Linha bidirecional de dados invertida
C	GND

Fonte: Adaptado de NOVUS (2021a).

sendo possível comunicar em redes com 1 ou 2 stop bits (NOVUS, 2021a). Quando o controlador recebe um comando, é feita a verificação do CRC do quadro de mensagem. Se for constatado erro de CRC, o controlador não envia resposta para o mestre (NOVUS, 2021a).

Para utilizar a comunicação serial é necessário primeiramente fazer a configuração dos parâmetros de velocidade de comunicação, bit de paridade e do identificador (endereço) de nó único do escravo, direto no dispositivo, para possibilitar a interação com o mestre na rede. Essa configuração é apresentada no roteiro do Apêndice B.

Os parâmetros do dispositivo podem ser lidos e escritos por meio da comunicação serial, acessando os registradores internos do controlador. O Quadro 2 detalha os comandos de comunicação da rede Modbus disponíveis para acesso dos dados dos registradores do controlador.

Quadro 2 – Comandos de acesso de registradores pela rede Modbus

Código	Tipo de Acesso
03	Read Holding Register
05	Force Single Coil
06	Preset Single Register
16	Preset Multiple Register

Fonte: Adaptado de NOVUS (2021b).

Cada parâmetro é representado pelo tipo de dado word (16 bits), com sinal em complemento de 2, ou representado por um bit. Dessa forma, um mestre conectado à rede Modbus RTU consegue monitorar e/ou configurar esses parâmetros através dos endereços de memória do controlador (NOVUS, 2021b).

As estratégias de controle disponíveis são controle PID ou controle ON/OFF. O método de controle PID é baseado em um algoritmo que atua em função do desvio do *PV* (variável de processo) em relação ao *SP* (setpoint ou valor de referência de temperatura), com base nos parâmetros *Pb* (proporcional), *Dt* (derivativo) e *Ir* (integral) estabelecidos, que podem ser configurados manualmente pelos parâmetros ou determinados por sintonia automática (determinação) e/ou autoadaptativa (otimização), chamada também de auto-tune. O controle ON/OFF é ativado quando o parâmetro *Pb* recebe o valor zero (NOVUS, 2021a).

O Quadro 3 mostra as opções de sintonia disponíveis e o modo de ação de cada uma, configuráveis no parâmetro *Atun*. Para ativar o auto-tune dos parâmetros PID, o modo de controle do parâmetro *Ctrl* deve estar configurado como *Auto* (automático).

Quadro 3 – Modos de sintonia do controlador PID N1200

Modo	Descrição	Sintonia
<i>OFF</i>	Os parâmetros PID não são automaticamente determinados	-
<i>FAST</i>	Sintonia automática uma única vez, e retorna para o modo <i>OFF</i>	Automática
<i>FULL</i>	Sintonia automática mais precisa que o modo <i>FAST</i>	Automática
<i>SELF</i>	Sintonia autoadaptativa inicia quando o desempenho piorar	Autoadaptativa
<i>RSLF</i>	Sintonia automática inicial e retorna para o modo <i>SELF</i>	Automática Autoadaptativa
<i>TGHT</i>	Sintonia autoadaptativa como no modo <i>SELF</i> sintonia automática quando <i>Run = Yes</i> e ao ligar	Automática Autoadaptativa

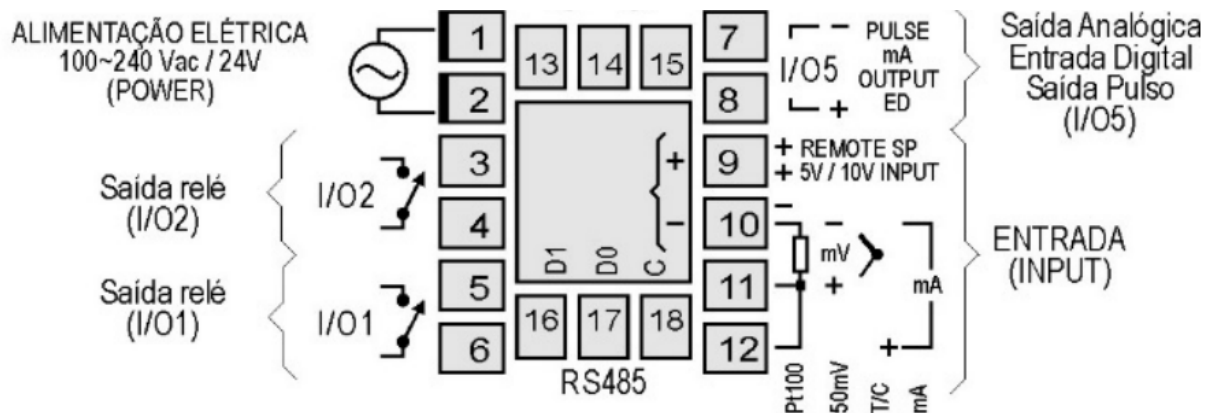
Fonte: Adaptado de NOVUS (2021a).

A ação de controle pode ser configurada para ação reversa (aquecimento) *rE* ou direta (refrigeração) *dIr* no parâmetro *Act*. Uma liga a saída de controle quando a variável de processo (*PV*) estiver abaixo do valor de referência (*SP*) e a outra acima da referência, respectivamente (NOVUS, 2021a). O parâmetro *Unit* define a unidade de temperatura a ser utilizada, que será configurada em graus Celsius.

O controlador possui canais de entrada e saída (I/Os) que podem operar como entrada ou saída digital, saída de controle e saída de alarme. Dentre as saídas de controle disponíveis, foi utilizada no projeto a I/O2 como saída do tipo relé SPST-NA, com suporte de corrente de até 1,5A e tensão de até 240Vca (NOVUS, 2021a).

O esquema elétrico do controlador PID N1200 é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Esquema elétrico do controlador PID N1200



Fonte: NOVUS (2021a).

Para funcionar como saída de controle com acionamento por relé, o parâmetro da I/O2 deve ser configurado como *Ctrl*. Por ser um contato seco, que não fornece energia para o sistema, a saída do controlador não foi utilizada diretamente para chavear o circuito de potência do objeto a ter sua temperatura controlada, mas sim para chavear a alimentação da bobina de uma contadora, e os contatos da contadora chaveando o circuito de potência.

Pelo fato do controle de temperatura ser um processo lento, foi optado pelo uso de uma saída de controle com acionamento por relé, pois, apesar do chaveamento ativo, a velocidade de chaveamento seria lenta o suficiente para não acelerar o processo de desgaste mecânico da contadora.

O parâmetro *Run* habilita as saídas de controle e deve ser configurado como *Yes* para iniciar o processo de auto-tune, ativando a ação de controle. A Figura 25 mostra as variáveis de interesse e os sinalizadores de estados do controlador.

As variáveis de interesse que serão monitoradas durante o processo são o setpoint (*SP*), que corresponde ao valor de referência para o controle de temperatura, a qual deve ser ajustada entre os limites configurados nos parâmetros *SPLL* e *SPHL*, e a variável de processo (*PV*), que representa o valor de temperatura obtido pelo termopar.

Todos os parâmetros configurados no controlador PID N1200 são apresentados no roteiro do Apêndice B. Os demais parâmetros não citados devem permanecer com o valor padrão.

Figura 25 – Display principal do controlador PID N1200



Fonte: NOVUS (2021a)

3.2.1.1 Termopar tipo K

O termopar tipo K (Figura 26) foi selecionado como sensor de temperatura por ser um dos equipamentos de medição compatíveis com o controlador PID N1200. Este oferece suporte com calibração da entrada de tensão em mV em uma curva de temperatura dentro da faixa de span de -150 à 1370°C , com exatidão de $0,25\%$ do span $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (NOVUS, 2021a).

Figura 26 – Termopar tipo K



Fonte: Robo Builders (2024).

3.2.1.2 Ferro de solda

Foi escolhido um ferro de solda comum (Figura 27) para ser o objeto a ter sua temperatura controlada e mensurada. Além de ser um objeto resistivo que permite o controle de temperatura pela média de potência fornecida, este faz parte do cotidiano dos alunos de engenharia mecatrônica, com diversas aplicações dentro e fora da sala de aula e laboratórios.

Este ferro de solda da marca Hikari possui alimentação de tensão nominal 220Vca e potência nominal de 34W , sem controle de temperatura interno. Considerando

Figura 27 – Ferro de solda Hikari



Fonte: Autor (2024).

o ferro como uma carga puramente resistiva, com fator de potência aproximadamente igual a 1, a estimativa de corrente consumida para os valores nominais é dada por:

$$P_{med} = I_{RMS} V_{RMS} = \frac{34}{220} = 0,15A \quad (16)$$

3.2.1.3 Contatora

Foi utilizada uma contatora Metaltex CNU-16 (Figura 28), com acionamento da bobina e contatos 220Vca e potência de até 4kW, sobredimensionada para funcionar como circuito de potência do ferro de solda.

Figura 28 – Contatora Metaltex 220Vca

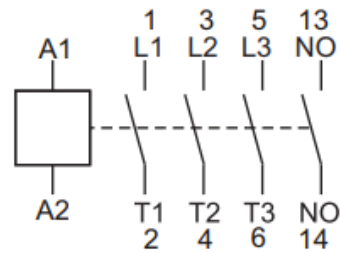


Fonte: Metaltex (2024).

A Figura 29 mostra o esquema elétrico apresentado no manual da contatora (METALTEX, 2024), onde A1 e A2 são as entradas de alimentação da bobina e os outros terminais são os contatos auxiliares.

A contatora foi aplicada na saída de controle do controlador PID para acionar a carga (ferro de solda) a partir de seus contatos auxiliares, isolando o circuito de potência do sinal de acionamento.

Figura 29 – Esquema elétrico contatora Metaltex 220Vca



Fonte: Metaltex (2024).

3.2.2 Multimetro

O multimetro IMS PowerNET M-200 (Figura 30) foi escolhido para realizar a aferição dos sinais elétricos da carga a ser controlada (o ferro de solda), sendo o segundo nó da rede. Com este dispositivo é possível monitorar valores de corrente, tensão, potência, demanda de potência e energia, instantâneos e estatísticos, por meio do acesso das memórias dos seus registradores pela interface de comunicação serial RS-485 em modo half-duplex (2 cabos), utilizando o protocolo Modbus RTU, ou também pelo próprio display (IMS, 2017).

Figura 30 – Multimetro PowerNET M-200



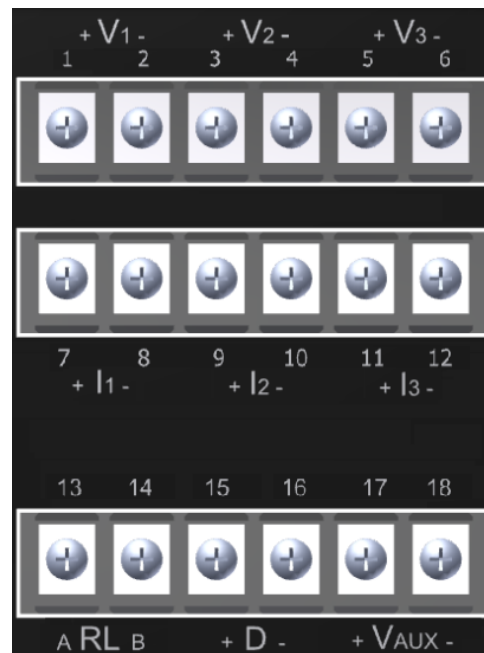
Fonte: IMS (2017).

O multimetro realiza medição de tensão de até 500Vca e de corrente de até 5A (IMS, 2017), características se encaixam na aplicação de medição dos sinais de alimentação do ferro de solda.

A Figura 31 mostra os bornes de conexões do equipamento para medição, com entradas de tensão (V_1 , V_2 e V_3) e corrente (I_1 , I_2 e I_3), por fase, alimentação (V_{aux}) e conexão serial RS-485 ($D+$ e $D-$).

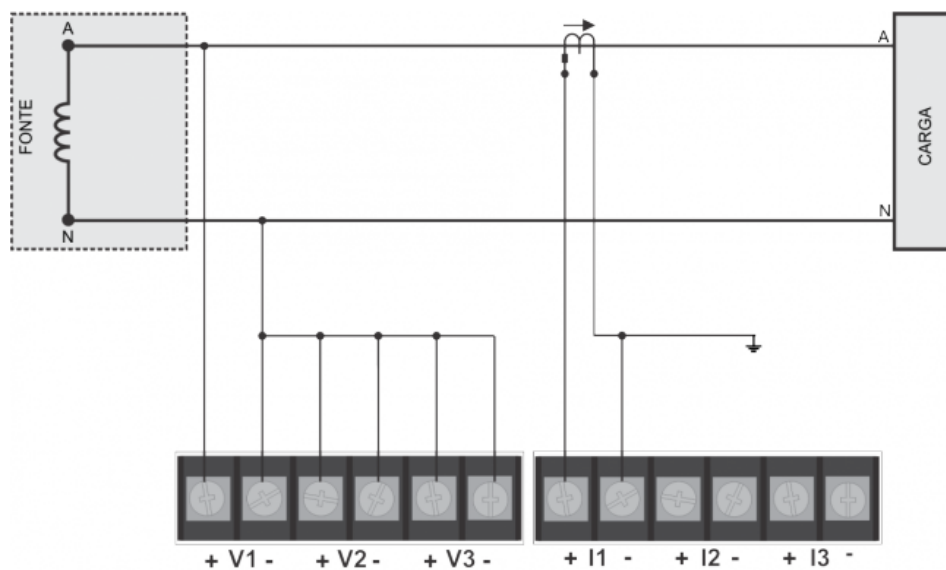
As topologias de conexão para medição são configuráveis, com opções monofásica, bifásicas e diversas configurações trifásicas. Com a alimentação do ferro de solda monofásica, a conexão elétrica para medição utilizada é o sistema 01, conforme a Figura 32. Este parâmetro deve ser configurado no equipamento.

Figura 31 – Conexões dos bornes do painel do multimedidor M-200



Fonte: (IMS, 2017).

Figura 32 – Sistema 01: 1P2W-1V1C monofásico (LN)

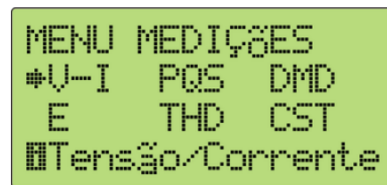


Fonte: IMS (2017).

A frequência nominal da rede (60Hz) e o ajuste da polaridade dos sensores de corrente, assim como os parâmetros de comunicação serial e da rede Modbus, são apresentados no roteiro de configuração da rede do Apêndice B, juntamente com todos os parâmetros gerais configurados no equipamento.

No menu de medições do multimedidor é possível monitorar os dados pelo próprio display. Na tela $V - I$ (Figura 33) podem ser visualizadas a tensão de fase V (V), corrente I (A) e frequência F (Hz).

Figura 33 – Tela de menu de medições do multimetror M-200



Fonte: IMS (2017).

Na tela *PQS* são apresentadas as medições de potência ativa P (W), reativa Q (VAR) e fator de potência FP . Na tela *DMD* são as demandas de potência ativa Pd (W), reativa Qd (VAR) e aparente Sd (VA), dentro de um intervalo de 15 minutos. Na tela *E* é apresentado o consumo de energia em kilowatts-hora (kWh). É possível realizar o reset dos valores das medições no menu principal na tela *RST* (IMS, 2017).

3.2.3 Conversor RS-485-USB

A fim de realizar a ligação entre o barramento de comunicação serial dos dispositivos da rede RS-485 (controlador PID e multimetror) e o mestre Modbus RTU, o qual está inserido no software Labview em um notebook, é necessário a utilização de um conversor para a entrada USB do notebook. O notebook utilizado possui processador Intel Core i5 3ª geração 2.6GHz, com placa de vídeo integrada Intel HD Graphics 4000, memória RAM DDR3 de 8GB e sistema operacional Windows 10 x64.

O dispositivo escolhido foi o conversor Novus USB-i485 (Figura 34), detectado e instalado automaticamente como uma porta COM no notebook. Este dispositivo pode operar na rede RS-422 e RS-485 em modo full duplex (4 fios) ou half duplex (2 fios). Neste segundo modo, o controle do fluxo de dados é realizado automaticamente pelo conversor, permitindo taxas de comunicação de dados entre 300 bps e 250 kbps (NOVUS, 2024).

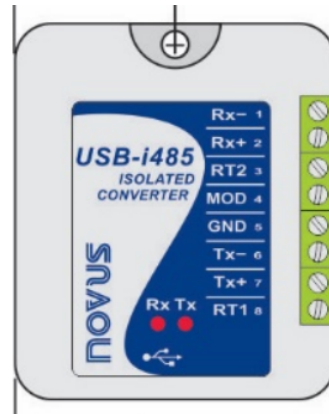
A Figura 35 apresenta as conexões de ligações conforme o modo de operação. É recomendável utilizar cabo do tipo par trançado para fazer a ligação dos barramentos de comunicação entre os equipamentos da rede, segundo as normas do protocolo RS-485.

A equivalência dos termos de ligações RS-485 é apresentada no Quadro 4.

3.2.4 Software Labview

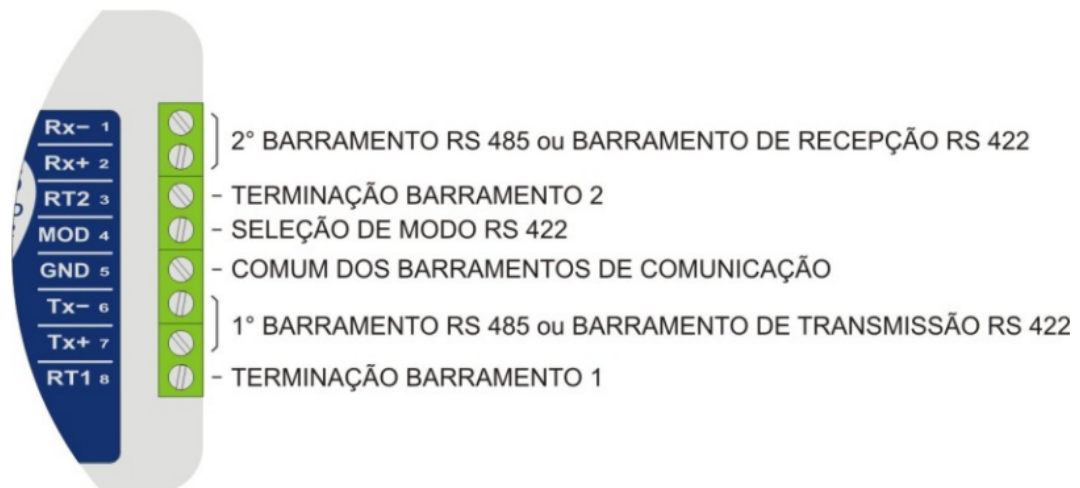
O Labview é um software de programação desktop em diagrama de blocos que usa o fluxo de dados entre os nós para determinar a ordem de execução dos blocos. Desenvolvido pela National Instruments, apresenta flexibilidade para aplicações de sistemas de medição, controle e automação de processos (KALKMAN, 1995).

Figura 34 – Conversor Novus USB-i485



Fonte: Novus (2024).

Figura 35 – Conexões da rede do conversor Novus USB-i485



Fonte: Novus (2024).

O ambiente do diagrama de blocos espelha os objetos utilizados na interface do painel frontal, onde é possível desenvolver uma interface gráfica de acordo com a aplicação utilizando inputs do usuário por botões, seletoras, valores do teclado, e apresentando as saídas do programa por indicadores, gráficos, LEDs, etc (KALKMAN, 1995).

O Labview suporta protocolos com padrão industrial disponíveis em bibliotecas e APIs (Application Programming Interfaces). Alguns dos protocolos de comunicação suportados pelo Labview são TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), UDP (User Datagram Protocol), protocolos de comunicação serial (RS-232, RS-422, RS-485, Modbus), Bluetooth, SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), HTTP (Hypertext Transfer Protocol), entre outros (NATIONAL INSTRUMENTS, 2024).

O software possui um API para utilização do protocolo Modbus (RTU, ASCII e TCP), com funcionalidades integradas para emular um dispositivo mestre ou escravo

Quadro 4 – Equivalência de termos da comunicação serial

Conversor Novus USB-i485	Equivalência
$RX+$ ou $TX+$	$D1$ $D+$ D B
$RX-$ ou $TX-$	$D0$ $D-$ \overline{D} A

Fonte: Adaptado de Novus (2024).

da rede e obter acesso de memória de registradores dos escravos por comunicação serial pelas portas COM do computador (NATIONAL INSTRUMENTS, 2023).

O Labview foi o software supervisor escolhido para hospedar o mestre da rede Modbus RTU do protótipo, gerenciar a comunicação entre o mestre e os escravos e implementar a interface para monitoramento do sistema.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DIDÁTICO

Um painel de energia com tampa de acrílico transparente foi utilizado para alocar os equipamentos do protótipo e permitir a visualização interna. Foram feitos os recortes na tampa para encaixar os dispositivos com display e os demais foram alocados no fundo utilizando parafusos, conforme a Figura 36. Nas laterais foram utilizados furos existentes para a passagem dos cabos de alimentação da rede, cabo USB, cabo do sensor termopar e instalada uma tomada para a conexão do ferro de solda e um interruptor para ligar a alimentação.

Para o suporte do multimedidor M-200 pelo lado interno, foram utilizadas 2 presilhas, fixas uma de cada lado do dispositivo, desenvolvidas pelo autor e impressas com polímero em 3D (Figura 37), com parafusos para fazer pressão contra a tampa e manter o multimedidor estático. O furo do controlador PID ficou justo o suficiente e não foi utilizado nenhuma presilha de fixação.

Para realizar a medição de temperatura, foi feito um furo no suporte do ferro de solda para rosquear e fixar o sensor, de modo que sua ponta fique encostada no ferro, conforme a Figura 38.

3.3.1 Diagrama Elétrico

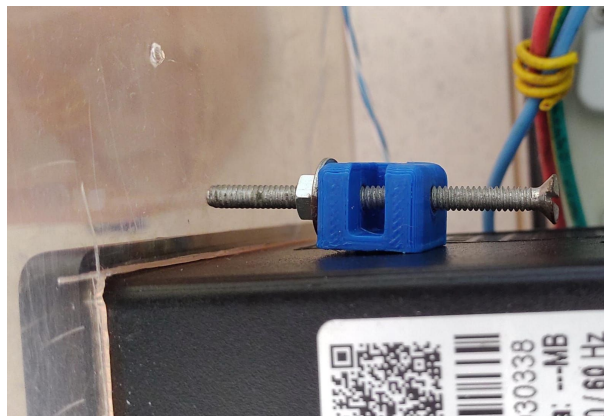
A alimentação dos equipamentos e as ligações elétricas entre eles são apresentadas na Figura 39, de acordo com as informações dos manuais apresentadas anteriormente. A rede monofásica 220Vca foi distribuída em paralelo para as entradas

Figura 36 – Protótipo didático



Fonte: Autor (2024).

Figura 37 – Presilha para suporte do multimedidor M-200



Fonte: Autor (2024).

de alimentação dos equipamentos, após a fase passar pelo interruptor.

O contato I/O2 do controlador chaveia a fase para alimentação da bobina da contatora (contato $A1$), a qual controla a alimentação do ferro de solda através dos contatos auxiliares $L2$ e $L3$. A medição dos sinais elétricos da carga foi acrescentada entre a contatora e o ferro de solda. A entrada de tensão do multimedidor foi colocada em paralelo com a alimentação do ferro e a entrada de corrente em série com a fase.

O termopar foi conectado aos bornes do controlador obedecendo a polaridade das entradas. Para a conexão dos dispositivos da rede RS-485 em modo half-duplex (dois cabos) na topologia barramento (bus), com comprimento bem inferior a 1200m, foi utilizado cabo do tipo par trançado e realizada a conexão dos bornes dos dispositivos conforme o esquema de ligação equivalente apresentado anteriormente no Quadro 4, mantendo a rede dentro dos padrões físicos estabelecidos pelo protocolo RS-485.

Figura 38 – Suporte do ferro de solda com o termopar fixo



Fonte: Autor (2024).

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE SCADA

A implementação do software para comunicação de dados pela rede e da interface do usuário foi feita no Labview, instalado no notebook, o qual possui comunicação serial USB pela porta COM4 com o conversor RS-485. Foi utilizada a versão 2019 do Labview.

Para o programa do diagrama de blocos rodar em loop, foi utilizado um bloco de função *while* com o botão *Exit* como condição de saída, e assim, encerrar a aplicação no software. Dentro do loop há um bloco *case* que estabelece as condições para iniciar a comunicação do mestre com os nós escravos, conforme o fluxograma da Figura 40.

De acordo com o manual NOVUS (2021a), alguns dos parâmetros apresentam valores multiplicados por 10 e 100, portanto, foram tratados no diagrama de blocos para apresentarem valores de acordo com o padrão de unidades de medida internacional.

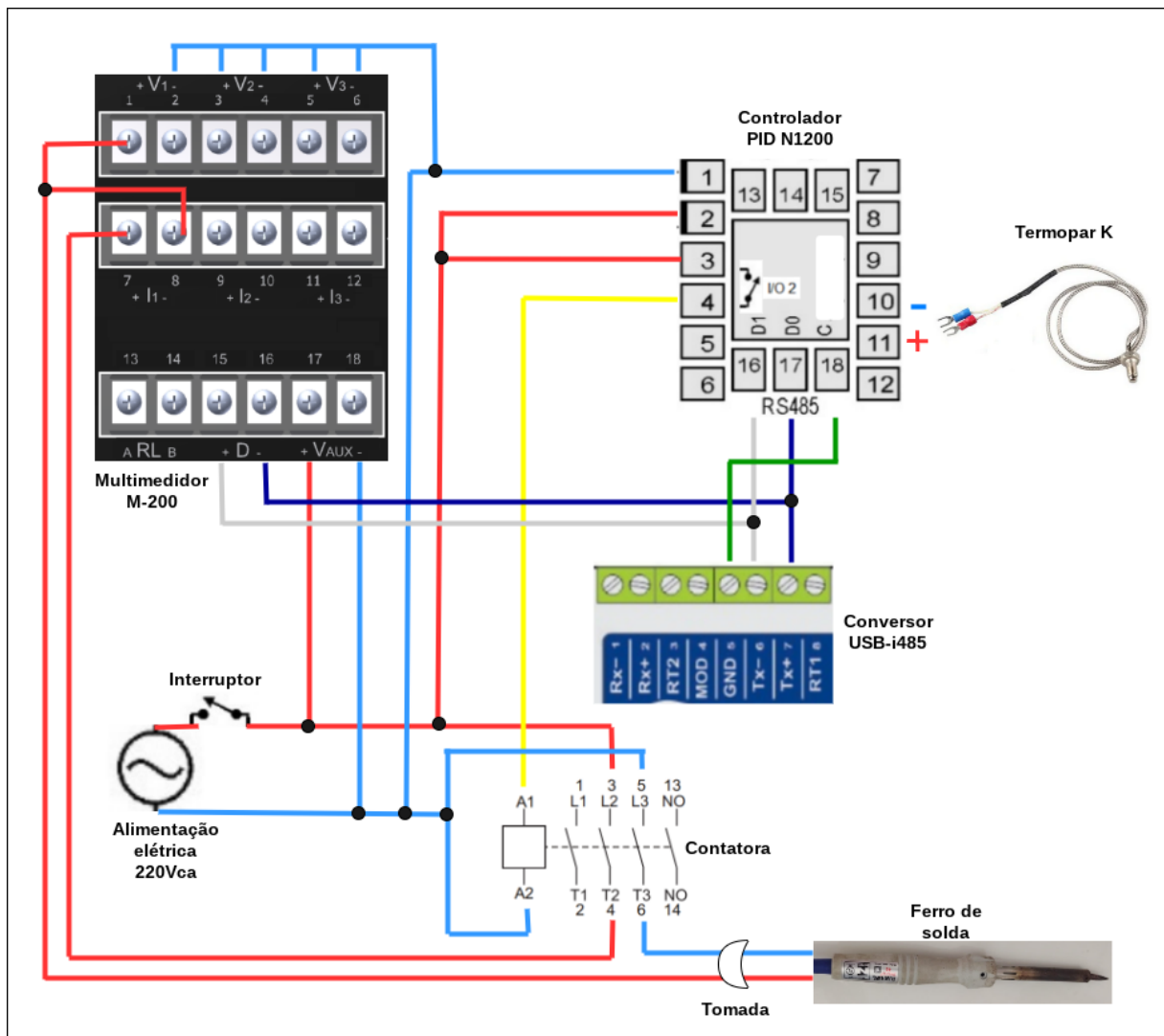
3.4.1 Comunicação Modbus RTU

O software Labview possui blocos integrados para criação de um mestre da rede Modbus RTU e monitoramento de variáveis de processo. Dessa forma, o mestre (notebook) pode operar requisitando um comando de escrita ou leitura de dados de parâmetros dos escravos da rede (controlador PID e multimetedor), acessíveis através de endereços dos registradores que mantém esses dados na memória dos dispositivos.

Os registradores são endereços de memória de 16 bits (word) ou de 1 bit (coil), mas nem sempre os dados lidos pelos sensores geram dados nesses formatos, sendo comum a conversão de dados maiores, como com 32 bits, em mais de um registrador de 16 bits (HALVORSEN, 2023).

As requisições de comunicação são feitas dentro do bloco de função *case* para

Figura 39 – Esquema elétrico do protótipo



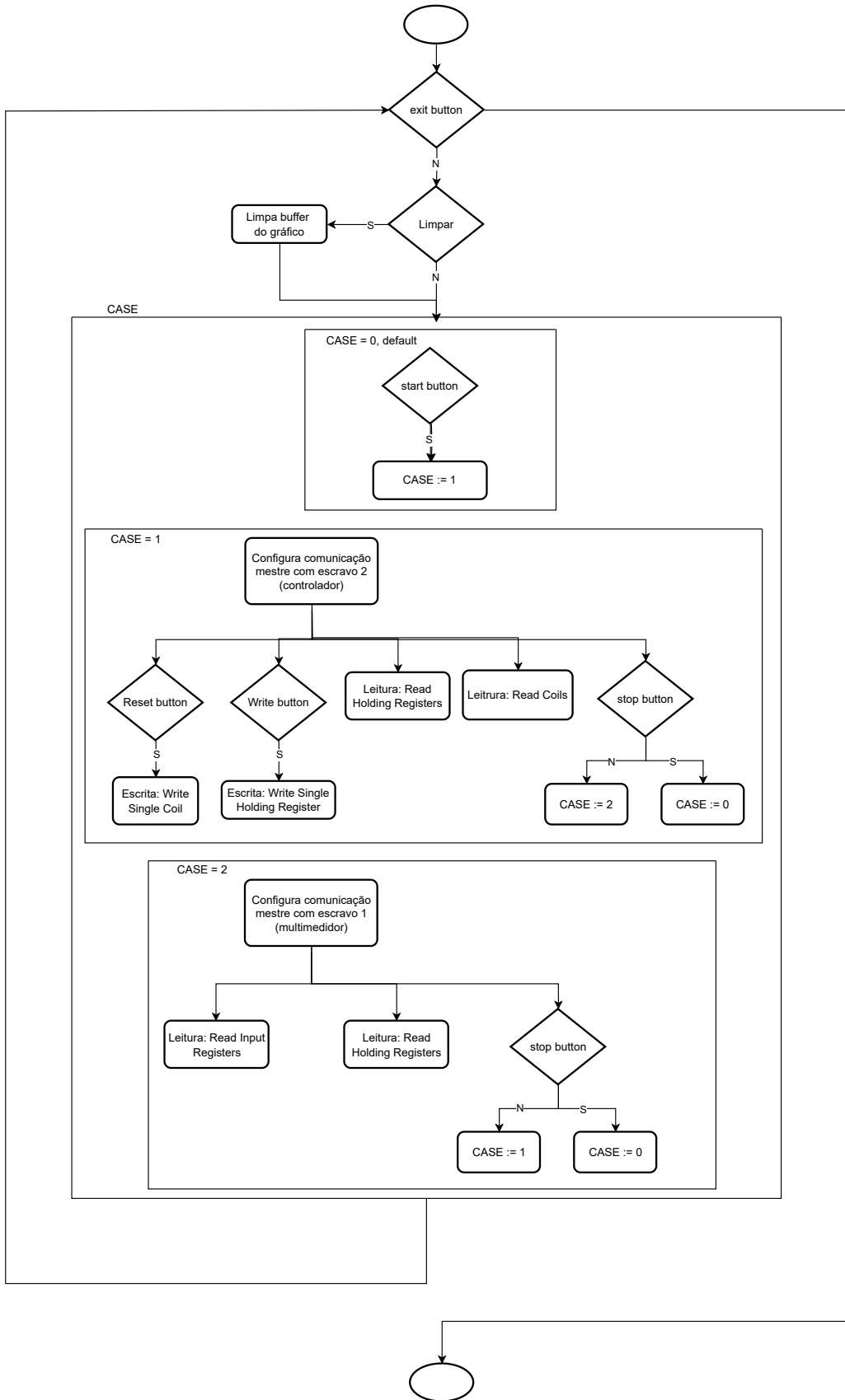
Fonte: Autor (2024).

cada nó da rede, realizadas sequencialmente alternando o ciclo de comunicação entre os escravos (Figura 40). Para cada requisição de comunicação é necessário criar uma instância mestre da rede Modbus com entradas configuráveis, apresentadas no roteiro de configuração da interface no Apêndice B.

Como especificado nas características do protocolo de rede Modbus RTU, o mestre e os escravos da rede foram configurados com a mesma taxa de transmissão de 9600bps, dentro da velocidade de 10Mbps estabelecida pelo padrão do meio físico RS-485, com configuração dos dados do quadro de mensagem com bit de paridade par (even), e assim, apenas 1 stop bit. A configuração dos parâmetros de comunicação do mestre da rede Modbus é mostrada no roteiro do Apêndice B.

Para o mestre transmitir ou receber dados pela rede, são utilizados blocos de funções Modbus, correspondentes aos respectivos códigos de função para cada tipo de acesso, e como entradas dos blocos, são passados o endereço de início do

Figura 40 – Fluxograma da implementação do software



Fonte: Autor (2024).

registrador, a quantidade de registradores acessados, e, se aplicável, o valor para escrita. Os códigos das funções utilizadas para o acesso de memória dos escravos são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Códigos das funções do protocolo Modbus utilizadas para comunicação

Códigos	Funções
01	Read coils (1 bit)
03	Read holding registers
04	Read input registers
06	Write single register

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após realizar a comunicação entre mestre e escravo dentro de cada bloco do *case*, a instância do mestre é fechada, desalocando toda a memória associada no processo de comunicação (NATIONAL INSTRUMENTS, 2023), criando uma nova no início de cada requisição do mestre. O multimedidor M-200 foi considerado o escravo com nó igual a 1 e o controlador PID N1200 o nó 2.

3.4.2 Interface do Usuário

Os parâmetros utilizados como entradas e saídas no diagrama de blocos criam automaticamente objetos no painel frontal, o qual opera como uma interface do programa. Nela, foram utilizadas listas de seleção de valores e botões para configurar os parâmetros de entrada, cada um com a sua devida identificação, conforme apresentado nos manuais dos dispositivos.

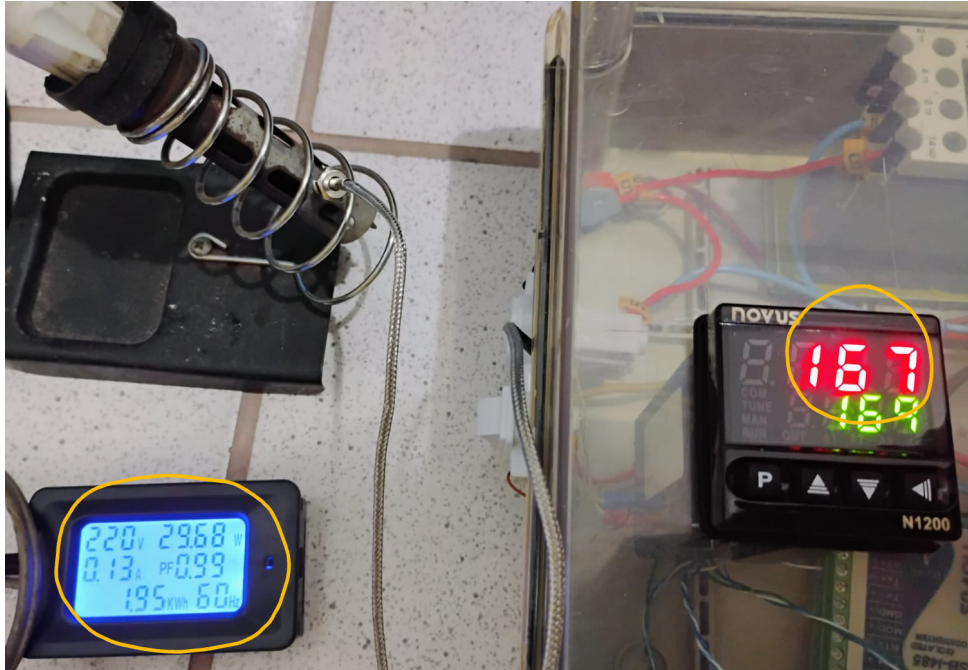
A interface e o diagrama de blocos do programa no Labview são apresentados no Apêndice A e o arquivo .vi do programa está disponível no GitHub <<https://github.com/carolinelaura/labview.git>>. Os detalhes da configuração dos parâmetros de rede e utilização da interface são apresentados no roteiro do Apêndice B.

3.4.3 Medições e Testes

Primeiramente foi realizada a aferição de tensão (V) e corrente (A) RMS, potência instantânea (W) e fator de potência com um medidor de energia invasivo disponível (marca Puccai) e a aferição da temperatura (°C) do ferro de solda utilizando o sensor termopar tipo K conectado ao controlador PID, com a carga ligada direto na alimentação da rede, sem controle de temperatura, ou seja, com um degrau de tensão de 220Vca aplicado ao sistema em malha aberta. Os valores obtidos são apresentados na Figura 41. A carga se mostrou praticamente puramente resistiva, com fator de

potência muito próximo de 1 (0,99), suficiente para valer a aproximação de corrente calculada de 0,15A para a potência nominal (34W).

Figura 41 – Medição de sinais elétricos e temperatura do ferro de solda em malha aberta



Fonte: Autor (2024).

Porém, a potência instantânea se manteve próxima de 30W, não alcançando a potência nominal do ferro (34W), assim, a corrente também ficou abaixo do calculado (0,15A), mantendo valores próximos de 0,13A. A temperatura medida (em vermelho) manteve valores abaixo de 170 °C após alcançar o regime permanente. A aferição dos sinais foi feita após constatação de estabilidade no valor de temperatura, aproximadamente 30 minutos após ligar o ferro diretamente na rede elétrica (220Vca). Os valores medidos são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Sinais elétricos e temperatura do ferro de solda em malha aberta

Sinais	Valores
Temperatura	167 °C
Tensão RMS	220Vca
Corrente RMS	0,13A
Potência instantânea	29,68W
Fator de potência	0,99

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após o ajuste inicial dos parâmetros de comunicação Modbus pelo display

do controlador PID e do multimedidor M-200 e dos parâmetros de configuração do mestre da rede na interface gráfica do Labview, foi apertado o botão *Start* para iniciar a comunicação entre os dispositivos. Com a comunicação estabelecida, foram configurados o resto dos parâmetros do sistema pela interface para adequar os dispositivos para o processo em questão, apresentados no roteiro de configuração do Apêndice B. Após todas as configurações realizadas, foi iniciado um ciclo de auto-tune do controlador PID no modo *RSELF*, com o valor de referência (setpoint) de temperatura em 60 °C.

Após a finalização do auto-tune, obteve-se os valores dos parâmetros PID (K_p , T_i e T_d) e o parâmetro de sintonia se alterou automaticamente para *SELF*, a fim de manter a sintonia autoadaptativa em caso de instabilidades no controle. A partir de então, foram realizados testes de validação da comunicação pela interface gráfica.

4 RESULTADOS

Com o protótipo montado, os parâmetros de comunicação do protocolo Modbus RTU configurados no mestre (Labview) e nos escravos, estabelecida comunicação entre os dispositivos da rede, realizada a medição de valores dos sinais elétricos em malha aberta do ferro de solda ligado direto na rede, sem o controle de temperatura, e após realizado o auto-tune para sintonia dos parâmetros PID do controlador com o sistema em malha fechada, foram realizados testes de validação da comunicação pela interface do usuário no Labview para constatar a autenticidade da leitura dos dados dos registradores dos dois escravos, em comparação com os valores obtidos pelos dispositivos industriais em seus próprios displays.

Para validação da escrita dos parâmetros no controlador PID, foram feitas alterações dos valores pela interface e a comparação dos valores escritos com os valores lidos dos registradores, tanto na interface como no display. A Figura 42 mostra o parâmetro *SPLL* alterado para 10°C. A alteração do setpoint de temperatura é apresentada na Figura 43. O gráfico mostra a mudança da referência de temperatura (setpoint) de 80°C para 60°C, em vermelho, e o display do controlador apresenta o setpoint em verde.

Como a medição dos sinais elétricos do circuito da carga foi realizada entre a contatora e o ferro de solda, a comutação da contatora, acionada a partir da saída de controle do controlador, provoca o zeramento dos sinais elétricos quando desligada, não influenciando na energia total consumida.

A Figura 44 mostra a operação de leitura das variáveis do multimedidor enquanto a saída de controle a relé do controlador está acionada, apresentando os sinais elétricos e de energia do circuito do ferro de solda. O LED da saída I/O2 permanece ligado até que a saída a relé seja desligada.

O gráfico da resposta de temperatura do sistema em malha fechada (temperatura medida), apresentado juntamente com a temperatura em malha aberta do ferro de solda (167°C) e com o valor de referência de temperatura (setpoint), que corresponde ao degrau de entrada do sistema, em regime transitório e permanente, é mostrado nas Figuras 45 e 46, respectivamente. No regime transitório, a resposta apresentou uma subida lenta com oscilações amortecidas sobre o valor de referência de temperatura.

Apesar da utilização da ação de controle PID em malha fechada com a ação integral buscando zerar o erro estacionário, a saída a relé do controlador utilizada para a ação de controle é uma saída discreta que se assemelha a um controle chaveado on/off. Assim, devido a essa limitação da saída, o erro estacionário não zerou completamente

Figura 42 – Escrita e leitura do parâmetro *SPLL* do controlador PID



Fonte: Autor (2024).

em regime permanente, apresentando uma variação de $\pm 1^\circ\text{C}$ para um degrau de referência de 60°C , cerca de 1,66%, conforme apresentado na Figura 46.

Devido à problemas de interferência na comunicação durante o chaveamento da contatora (erro de timeout), constatados durante os testes, foi adicionado um bloco de limpeza de erros após o fechamento da instância do mestre Modbus, para evitar a pausa para reconhecimento de erro no Labview, garantindo que o programa continue rodando normalmente com uma nova tentativa de comunicação entre mestre e escravo no próximo ciclo do programa, contudo, essa interferência resulta em erro na leitura de alguns dos registradores dos escravos e zera os valores lidos nesse determinado instante (Figura 45).

Após os testes de validação da comunicação pela interface, foi realizada a análise do sistema quanto ao atendimento dos requisitos de projeto, funcionais e

Figura 43 – Alteração do setpoint do controlador PID



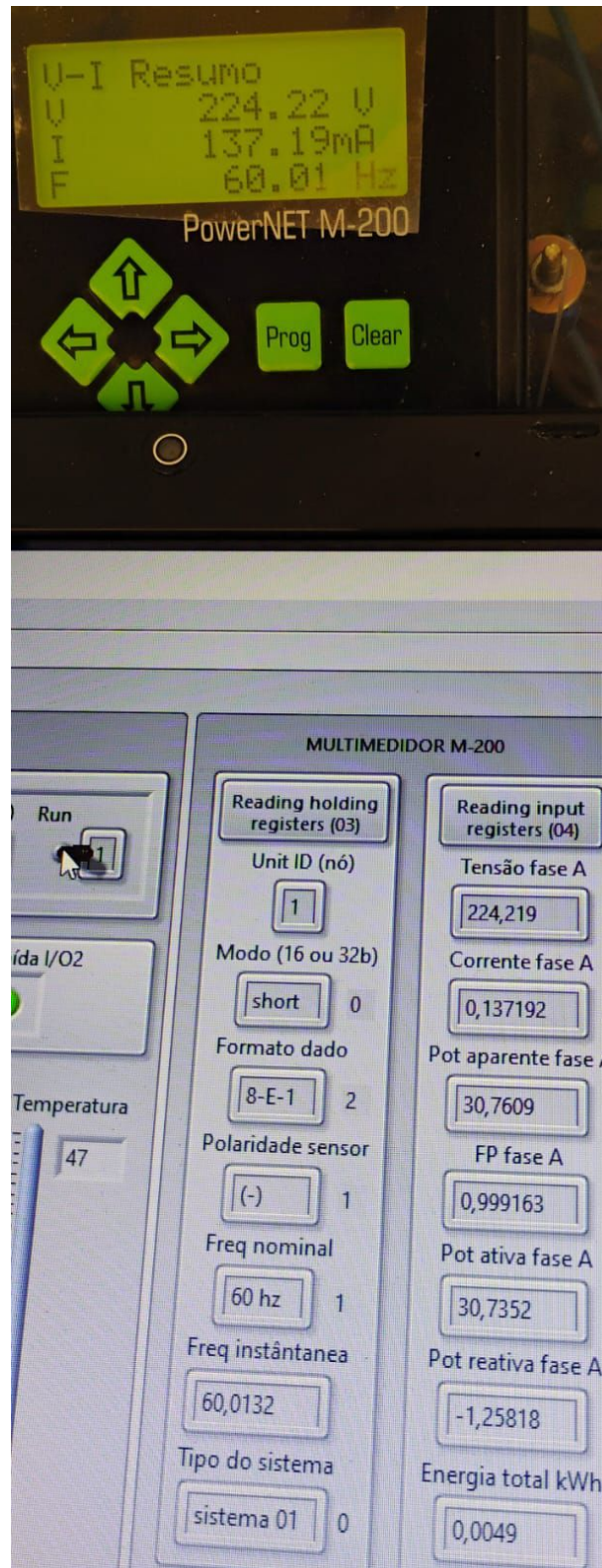
Fonte: Autor (2024).

não funcionais. Na escolha dos dispositivos foi optado somente por equipamentos comerciais industriais: a contatora, o controlador PID, o multimedidor e o conversor RS-485, sendo dois os escravos da rede, atendendo os requisitos RF1 e RFN1. A montagem do protótipo foi feita em um painel com tampa de acrílico para visualização dos componentes (requisitos RF4 e RFN3), além de facilitar o transporte.

A utilização de dois escravos na rede validou a aplicação da topologia em barramento com conexão multiponto, estabelecida pelo protocolo físico RS-485.

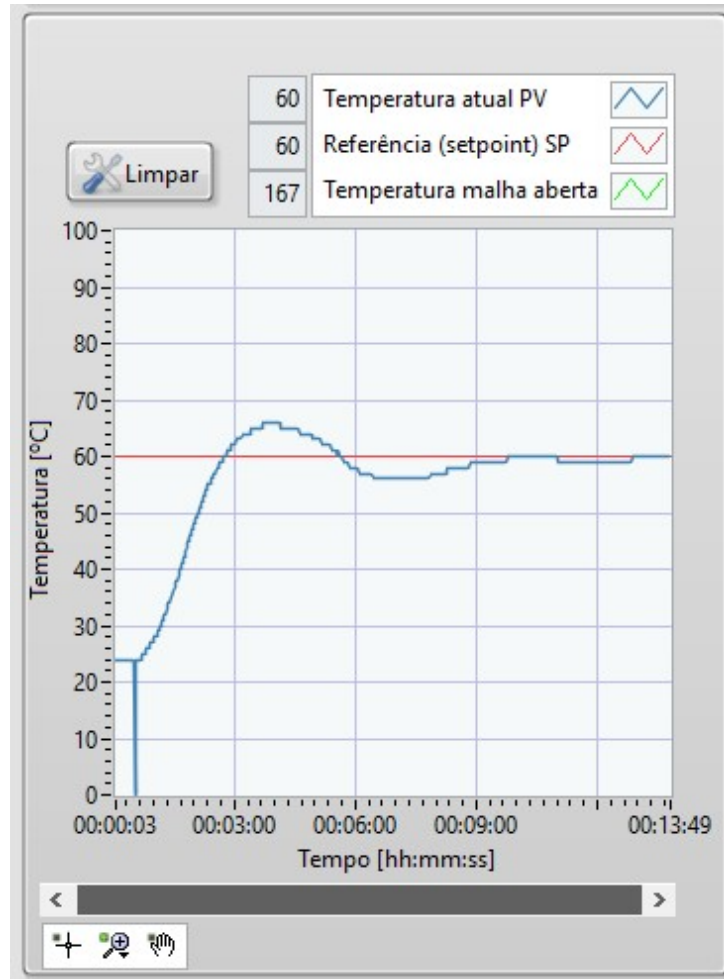
Na parte de software foi implementado o protocolo de rede Modbus RTU entre os dispositivos da rede (RF2), utilizando o software Labview para gerenciar a comunicação (RFN4), realizar o ajuste do controle de temperatura (RF3) de um ferro de solda comum (RFN2) pela rede e permitir a visualização dos parâmetros da rede e dos sinais elétricos pela interface do usuário (RF5 e RFN5). Um resumo da análise do cumprimento dos requisitos é apresentada no Quadro 7.

Figura 44 – Leitura dos registradores do multimetro M-200



Fonte: Autor (2024).

Figura 45 – Gráfico de temperatura x tempo do sistema durante o regime transitório



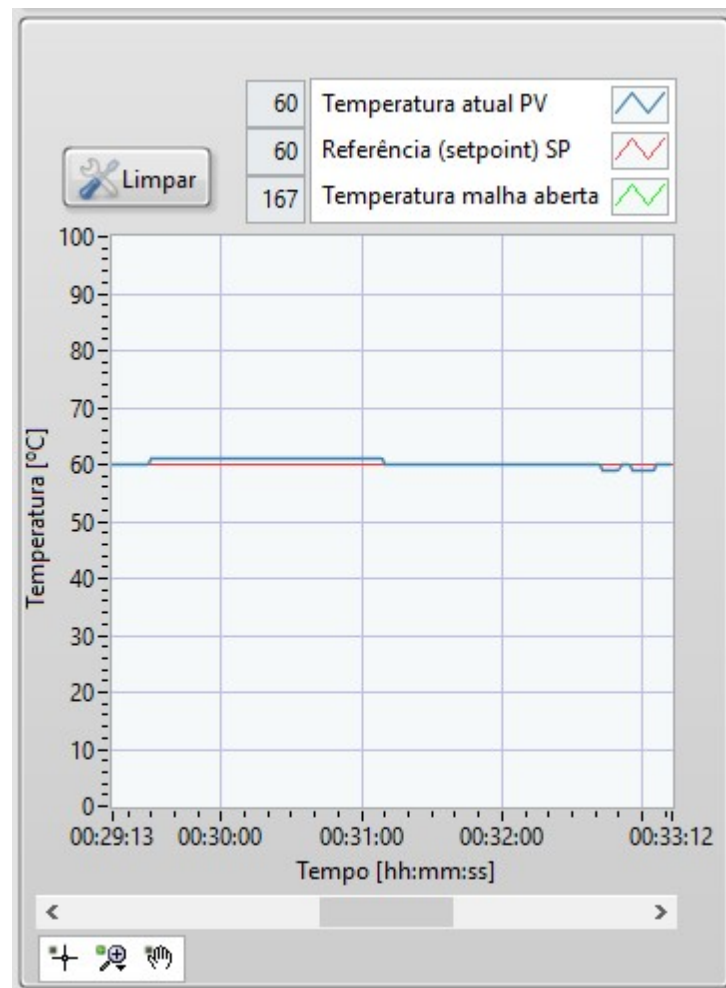
Fonte: Autor (2024).

Quadro 7 – Análise de cumprimento dos requisitos do projeto

Requisitos	Cumprido	Descrição
RF1 e RFN1	Sim	Utilização da contatora Metaltex, controlador PID N1200 e conversor RS-485 da Novus, multimetido M-200 da IMS e Labview da National Instruments
RF2	Sim	Dispositivos compatíveis com comunicação Modbus RTU e implementação da transmissão de dados pela rede
RF3	Sim	Ajuste dos parâmetros de controle e do setpoint de temperatura acessando os registradores do controlador pela rede
RF4 e RFN3	Sim	Utilização de um painel com tampa de acrílico
RF5 e RFN5	Sim	Escrita e visualização dos parâmetros do controlador e dos sinais elétricos do ferro pela interface
RNF2	Sim	Utilização de um ferro de solda
RNF4	Sim	Implementação do software do supervisor no Labview

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 46 – Gráfico de temperatura x tempo do sistema durante o regime permanente



Fonte: Autor (2024).

5 CONCLUSÕES

A aplicação de protocolos de rede para automação industrial permite o emprego de um padrão para o gerenciamento da troca de dados na comunicação entre dispositivos da rede e, desse modo, a configuração, monitoramento e controle de variáveis de processo de sistemas industriais, essenciais para garantir a confiabilidade do processo e a qualidade do produto final.

A utilização de meios didáticos para aplicações práticas de conceitos utilizados na indústria dentro do ambiente acadêmico tem papel significativo para o desenvolvimento profissional dos alunos. Nesse contexto, este trabalho teve como propósito desenvolver um protótipo de aplicação do protocolo de rede industrial Modbus RTU para controle de temperatura com fins didáticos.

O projeto cumpriu os objetivos estabelecidos inicialmente, iniciando com o levantamento de requisitos de projeto para o desenvolvimento do protótipo de aplicação da rede Modbus RTU empregando equipamentos comerciais industriais como o controlador de temperatura, o multimetror, conversor RS-485, além do emprego do software Labview, que permite aplicações tanto acadêmicas quanto industriais.

Ainda visando cumprir os objetivos, foi realizada a montagem mecânica e elétrica do painel didático para visualização dos componentes do protótipo, implementado o software para comunicação entre os dispositivos da rede utilizando o protocolo Modbus RTU e desenvolvida a interface para leitura e escrita das variáveis de processo para supervisão do controle de temperatura em tempo real de um ferro de solda e monitoramento de sinais elétricos do sistema, visto que a utilização do ferro de solda é uma atividade comum no meio acadêmico dos estudantes de engenharia mecatrônica.

Além dos objetivos propostos inicialmente, o protótipo cumpriu todos os requisitos de projeto levantados, manteve a comunicação serial entre os dispositivos da rede e operou de forma coerente para leitura e escrita dos registradores dos escravos da rede Modbus RTU e monitoramento do controle de temperatura do sistema, embora não tenha sido levado em consideração o algoritmo de controle, o retardo e a precisão das medições de temperatura com o termopar utilizado.

Dessa forma, o protótipo desenvolvido se torna viável para ser introduzido como uma ferramenta didática para auxiliar no ensino prático de redes industriais, com foco no protocolo de comunicação Modbus RTU, permitindo a utilização de tecnologias presentes na indústria a partir de uma aplicação acadêmica.

Para dar continuidade ao trabalho, sugere-se expandir as possibilidades de aplicação da rede Modbus RTU, implementando novas funcionalidades além do

monitoramento do controle de temperatura, como por exemplo, controle de nível, vazão, velocidade, entre outros, adequando o sistema de medição e o objeto de medição para a aplicação da rede. Além disso, visto que o software Labview apresenta outras possibilidades de aplicações de protocolos de rede, propõe-se a aplicação didática de outros protocolos industriais, com a adequação dos dispositivos compatíveis com a rede e da interface do usuário no mesmo software.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, M. A. S. **Fundamentos de Redes de Computadores**. 1. ed. [S.l.]: CETAM, 2010.
- ALFACOMP. **Controle de Temperatura**. 2022. Disponível em: <https://alfacomp.net/portfolio-item/controle-de-temperatura/>. Acesso em: 24 maio 2024.
- BAYER, F. M.; ARAUJO, O. C. B. de. **Controle Automático de Processos**. 1. ed. [S.l.]: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.
- CANSALAR, C. A.; MAVIŞ, E.; KASNAKOĞLU, C. Simulation time analysis of matlab/simulink and labview for control applications. In: **Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology**. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 470–473.
- CASSIOLATO, C. Redes industriais – parte 1. **Revista Saber Eletrônica**, v. 461, p. 24–32, maio - jun 2012.
- CORDEIRO, A. et al. Modbus protocol as gateway between different fieldbus devices - a didactic approach. In: **Proceedings of IGIP/ICL Conference**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 860–871.
- DALE, R. P.; STEPHEN, W. F. **Industrial Process Control Systems**. 2. ed. Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc, 2009.
- FAGUNDES, F. D. **Segurança em Redes Industriais: Aplicação da técnica de autenticação HB-MP* em rede Modbus**. 2022. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Uberlândia, 2022.
- FISCARELLI, R. B. d. O. Material didático e prática docente. **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação**, v. 2, n. 1, p. 31–39, dez. 2007. Disponível em: <https://periodicos.fclar.unesp.br/iberoamericana/article/view/454>.
- FONSECA, R. P. F. **Criação de uma interface gráfica virtual aplicada a um sistema de controle de processos**. 2017. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), 2017.
- FOROUZAN, B. A.; GRIESI, A.; FEGAN, S. C. **Data Communications and Networking**. 5. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2010.
- HALVORSEN, H.-P. **Modbus Overview**: with practical labview examples. 2023. Disponível em: <https://www.halvorsen.blog/documents/technology/resources/resources/modbus/Modbus%20Overview.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- IFELL. **Medição de Energia Elétrica**. São Paulo – SP, 2023. Disponível em: <https://www.ifell.com.br/medicao-de-energia-eletrica/>.
- IMS POWER QUALITY. **Manual de Programação IMS PowerNET M-200**: Multimetro e registrador de grandezas elétricas. São Paulo-SP, 2015. Disponível em: https://ims.ind.br/downloads/tabelas/tabela_M200.pdf. Acesso em: 11 out. 2023.

IMS POWER QUALITY. **Manual de Instalação e Operação IMS PowerNET M-200:** Multimetro e registrador de grandezas elétricas. São Paulo-SP, 2017. Disponível em: https://ims.ind.br/downloads/manuais/manual_M_200.pdf. Acesso em: 11 out. 2023.

INETEC. **Saídas Digitais a Relé, a Transistor e a Tiristores no PLC.** 2023. Disponível em: <https://inetec.com.br/saidas-digitais-a-rele-a-transistor-e-a-tiristores-no-plc/>.

KALKMAN, C. Labview: A software system for data acquisition, data analysis, and instrument control. **J Clin Monitor Comput**, v. 11, 1995.

KLEE, H.; ALLEN, R. **Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink.** 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2017.

KUGELSTADT, T. **Application Report:** The rs-485 design guide. Dallas, Texas, 2008. Disponível em: https://www.ti.com/lit/an/slla272d/slla272d.pdf?ts=1716180126551&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F. Acesso em: 19 maio 2024.

LRI AUTOMAÇÃO. **Protocolo Modbus na Indústria e sua Relevância.** 2023. Disponível em: <https://blog.lri.com.br/a-relevancia-fundamental-do-protocolo-modbus-na-industria/>.

METALTEX. **Contatores Tripolares:** Linha cn/cnu. São Paulo-SP, 2024. Disponível em: https://www.metaltex.com.br/assets/produtos/pdf/cn_cnu.pdf. Acesso em: 1 mai. 2024.

MODBUS.ORG. **MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide.** Hopkinton, Massachusetts, 2006. Disponível em: https://modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf. Acesso em: 19 maio 2024.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial.** 2. ed. [S.l.]: LTC, 2007.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Introduction to Modbus using LabVIEW.** 2023. Disponível em: <https://www.ni.com/en/shop/labview/introduction-to-modbus-using-labview.html>. Acesso em: 15 abr. 2024.

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Programming Reference Manual.** 2024. Disponível em: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/intro.html>. Acesso em: 15 abr. 2024.

NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA. **Controlador N1200:** Manual de instruções. Canoas-RS, 2021. Disponível em: <https://www.novus.com.br/pt/produto/controladores/n1200>. Acesso em: 10 out. 2023.

NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA. **Controlador N1200:** Tabela de registradores para comunicação serial. Canoas-RS, 2021. Disponível em: <https://www.novus.com.br/pt/produto/controladores/n1200>. Acesso em: 11 out. 2023.

NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA. **Conversor USB-i485 RS485/RS422:** Manual de instruções. Canoas-RS, 2024. Disponível em: https://cdn.novusautomation.com/downloads/manual_conversor_usb_i485_v10x_h_pt.pdf. Acesso em: 11 out. 2024.

NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA. **Conceitos Básicos de RS485 e RS422**. Porto Alegre - RS, 2012. Disponível em: <https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/conceitos%20b%C3%A1sicos%20de%20rs485%20e%20rs422.pdf>. Acesso em: 19 maio 2024.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. [S.l.]: Pearson, 2011.

RAMALHO, L. A. et al. Metodologia de experimentos didáticos zigbee para formação profissional. In: **Proceedings of the XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Blumenau - SC: COBENGE, 2011. Disponível em: <http://www.ipen.org.br/Artigos-congresso23-Sobena/SOBENA2010-58.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2024.

ROBO BUILDERS. **Sensor De Temperatura Termopar Tipo K**. 2024. Disponível em: <https://www.robobuilders.com.br/sensor-de-temperatura-termopar-tipo-k-0-a-800-c-3-metros>. Acesso em: 17 abr. 2024.

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. New York: McGraw Hill, 2013.

SCADA INTERNATIONAL. **SCADA systems explained**. 2024. Disponível em: <https://scada-international.com/what-is-scada/>.

SHARMA, K. L. S. **Overview of Industrial Process Automation**. 2. ed. Bengaluru, India: Elsevier, 2017.

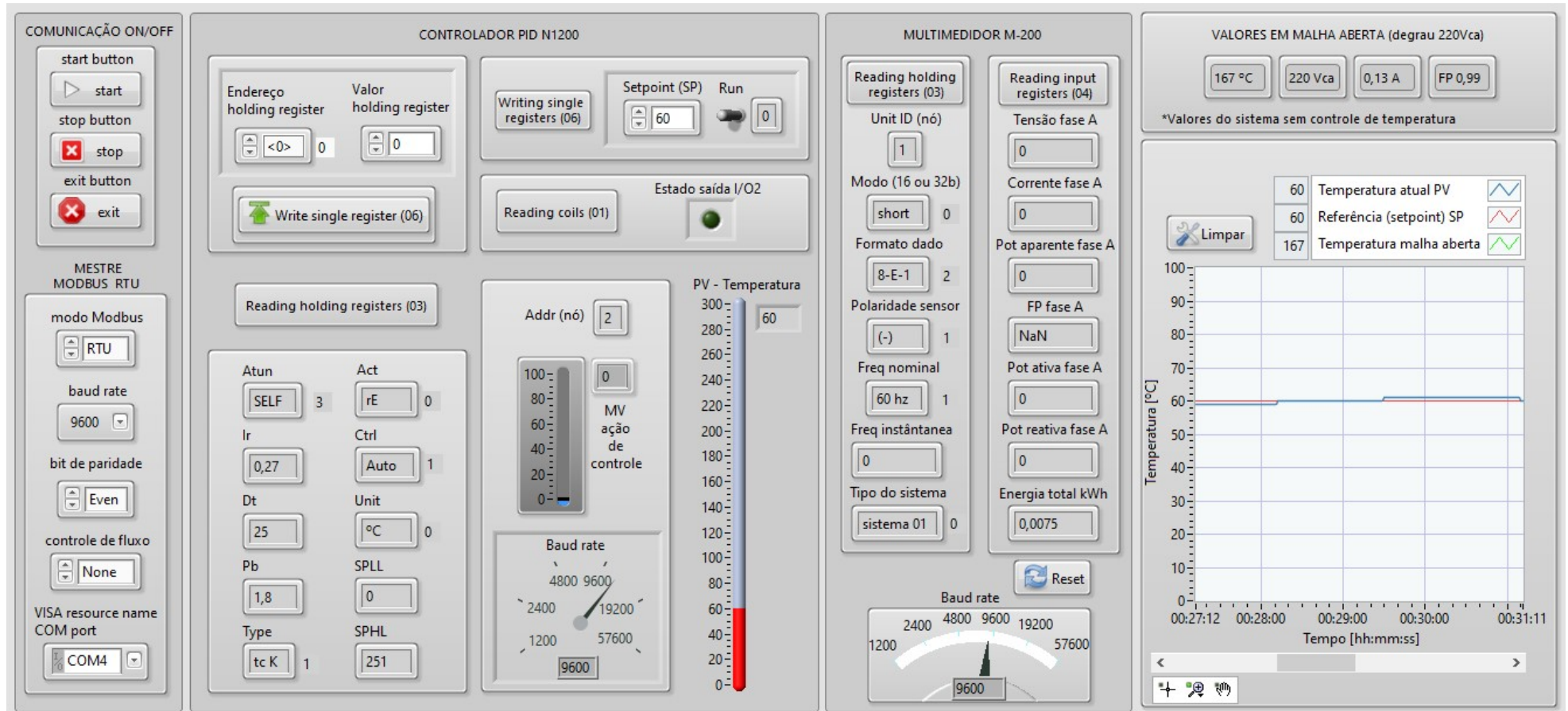
SOMMERVILLE, I. **Engenharia de Software**. 9. ed. [S.l.]: Pearson, 2011.

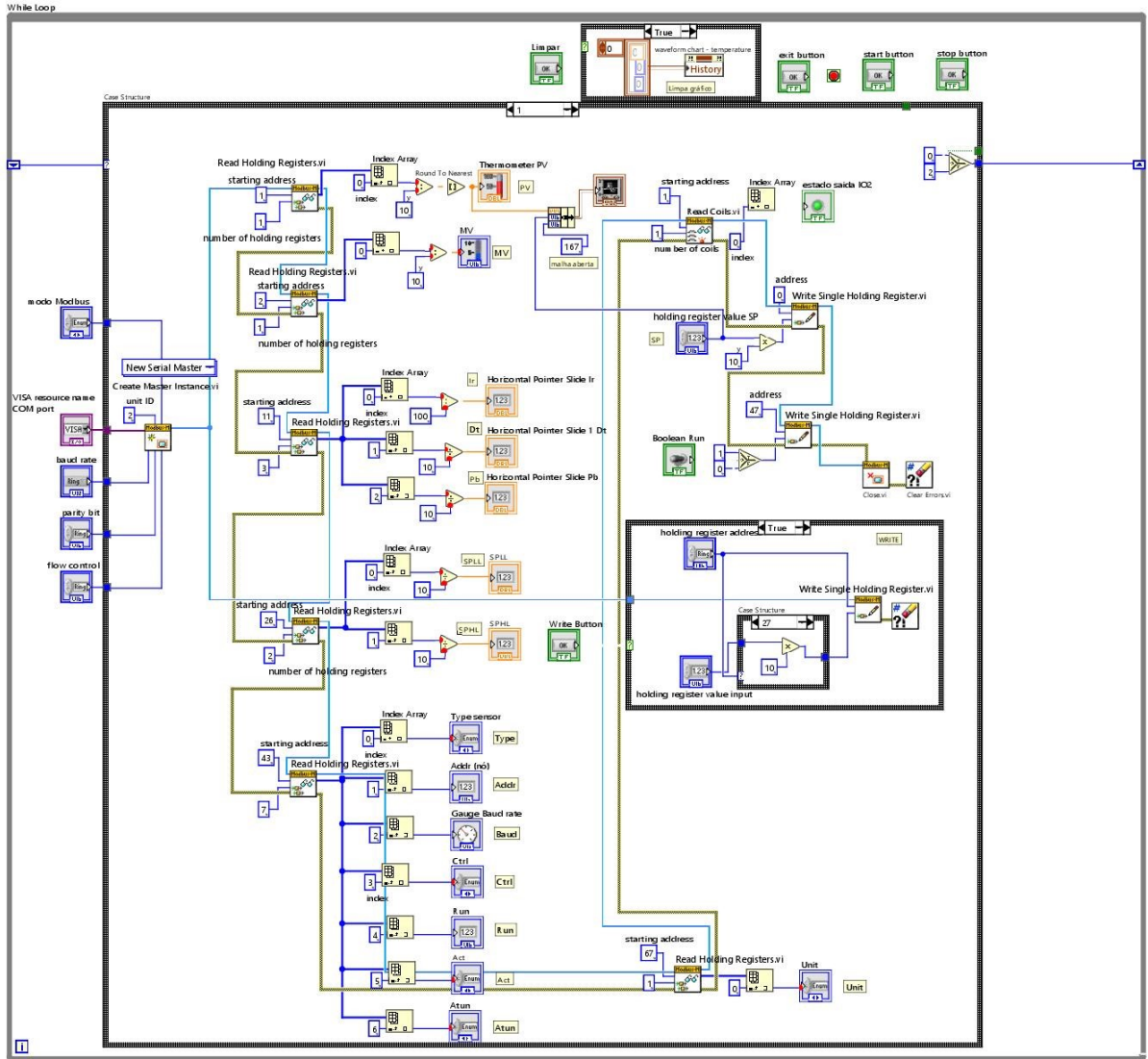
TANENBAUM, A.; WETHERALL, D. **Redes de Computadores**. 11. ed. [S.l.]: Pearson, 2021.

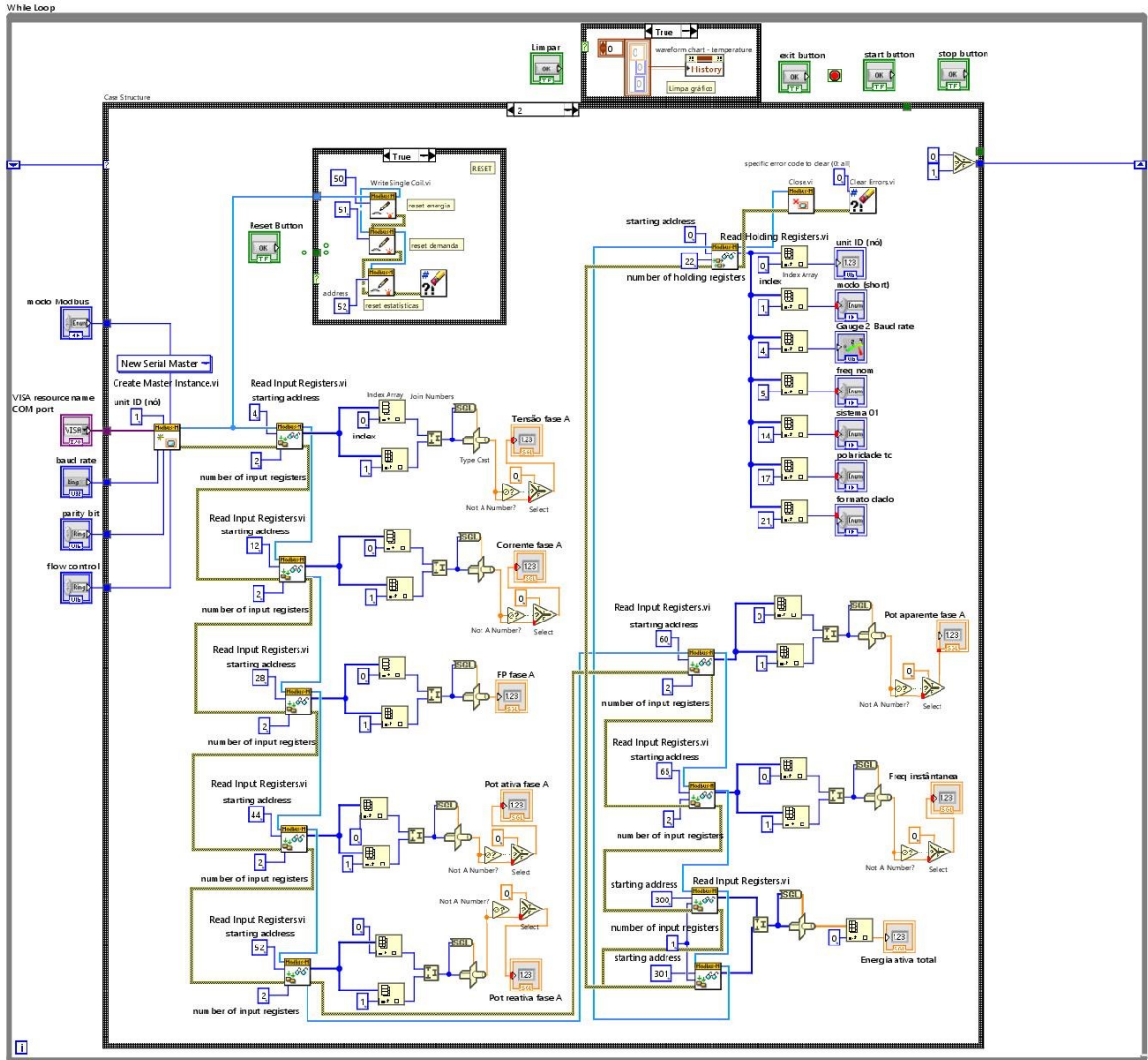
THOMAS, G. Introduction to modbus protocol. **The Extension**, v. 9, n. 4, p. 1–4, jul - ago 2008.

UNIVERSAL ROBOTS. **Redes Industriais**. 2022. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/redes-industriais-o-que-s%C3%A3o-principais-tipos-e-para-que-servem/>. Acesso em: 24 maio 2024.

APÊNDICE A - INTERFACE E DIAGRAMA DE BLOCOS DO SOFTWARE SUPERVISÓRIO DESENVOLVIDO NO LABVIEW







APÊNDICE B - ROTEIRO DE CONFIGURAÇÃO DA REDE MODBUS RTU E UTILIZAÇÃO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO NO LABVIEW

CONFIGURAÇÃO DA COMUNICAÇÃO SERIAL E DA REDE MODBUS RTU

Para a configuração dos parâmetros da comunicação serial e da rede Modbus RTU é necessário primeiramente configurá-los diretamente nos dispositivos escravos, pelos displays, e do mestre por meio da interface do supervisor no Labview.

Os parâmetros de rede do controlador PID N1200 e do multimedidor M-200 são apresentados nos Quadros 8 e 9, respectivamente.

Quadro 8 – Parâmetros de configuração rede do controlador PID N1200

Parâmetro	Descrição	Valor
<i>Baud</i>	Baud rate: taxa de transmissão	1.2, 2.4, 4.8, 9.6, 19.2, 38.4, 57.6 ou 115.2 kbps
<i>Prty</i>	Bit de paridade	<i>None</i> (nenhum), <i>Even</i> (par) ou <i>Odd</i> (ímpar)
<i>Addr</i>	Endereço de comunicação do controlador: identificador único do nó na rede	1 a 247

Fonte: Adaptado de NOVUS (2021a)

Quadro 9 – Parâmetros de configuração de rede do multimedidor M-200

Parâmetro	Descrição	Valor
Endereço	Endereço de comunicação	1 a 247
Formato (Modbus)	Formato para endereçamento	<i>Short</i> (16 bits) ou <i>Long</i> (32 bits)
Swap	Alternar a ordem dos dados	<i>None</i> , <i>Byte</i> , <i>Word</i> ou <i>Both</i>
Baud	Baud Rate	1.2 a 115,2 kbps
Formato (Serial)	Número de bits de dados paridade stop bits	8 bits <i>N</i> (None), <i>E</i> (Even), <i>O</i> (Odd) 1 ou 2

Fonte: Adaptado de IMS (2017).

O identificador único do nó do multimedidor foi definido como 1 e do controlador PID como 2. Para o multimedidor foi mantida a ordem dos dados sem swap de bits (none) e o formato de endereçamento dos registradores foi configurado com 16 bits (short).

Os parâmetros de rede do mestre, configurados pela interface no Labview, são apresentados no Quadro 10. Para a comunicação serial assíncrona, tanto o mestre

quanto os escravos da rede foram configurados com a mesma taxa de transmissão de 9600bps, com o campo de dados do quadro de mensagem com 8 bits, com a adição de um bit de paridade par (even) e um stop bit. Estes valores foram configurados como padrão na aplicação. A porta serial COM depende da configuração da porta USB do notebook onde está conectado o conversor RS-485-USB.

Quadro 10 – Configuração dos parâmetros de comunicação Modbus do mestre da rede

Parâmetros	Valores
Modo operação Modbus	RTU
Baud rate	9600bps
Bit de paridade	Par (Even)
controle de fluxo	Sem controle (None)
Porta serial COM	COM4

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além dos parâmetros de rede, foram configurados parâmetros gerais do multimedidor de acordo com o sistema montado no painel didático, sendo este monofásico, com alimentação 60Hz e com polaridade do sensor de corrente positiva (direta). Todos os os parâmetros utilizados no equipamento são apresentados no Quadro 11, os demais foram mantidos no padrão de fábrica.

Quadro 11 – Parâmetros de configuração aplicados ao multimedidor M-200

Parâmetro	Descrição	Valor
Ligação	Topologia de conexão para medição	1P2W-1V1C (01)
Fnom	Frequência nominal da rede	60Hz
Polarização (I1)	Polaridade do sensor de corrente I1	Direto (+)
Endereço	Identificador do nó na rede	1
Formato (Modbus)	Formato para endereçamento	Short (16 bits)
Swap	Alternar a ordem dos dados	None
Baud	Baud Rate	9600 bps
Formato (Serial)	Número de bits de dados paridade stop bits	8 – E – 1

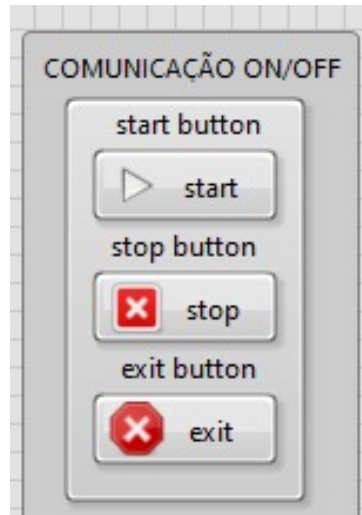
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

UTILIZAÇÃO DA INTERFACE NO LABVIEW

Após as configurações iniciais para possibilitar a interação entre os dispositivos pela rede, e com o conversor RS-485-USB conectado ao notebook, é possível iniciar a comunicação pela interface no Labview pelo botão *Start* e encerrar pelo botão *Stop*

(Figura 47).

Figura 47 – Interface para ligar e desligar a comunicação entre o mestre e os dispositivos da rede



Fonte: Autor (2024).

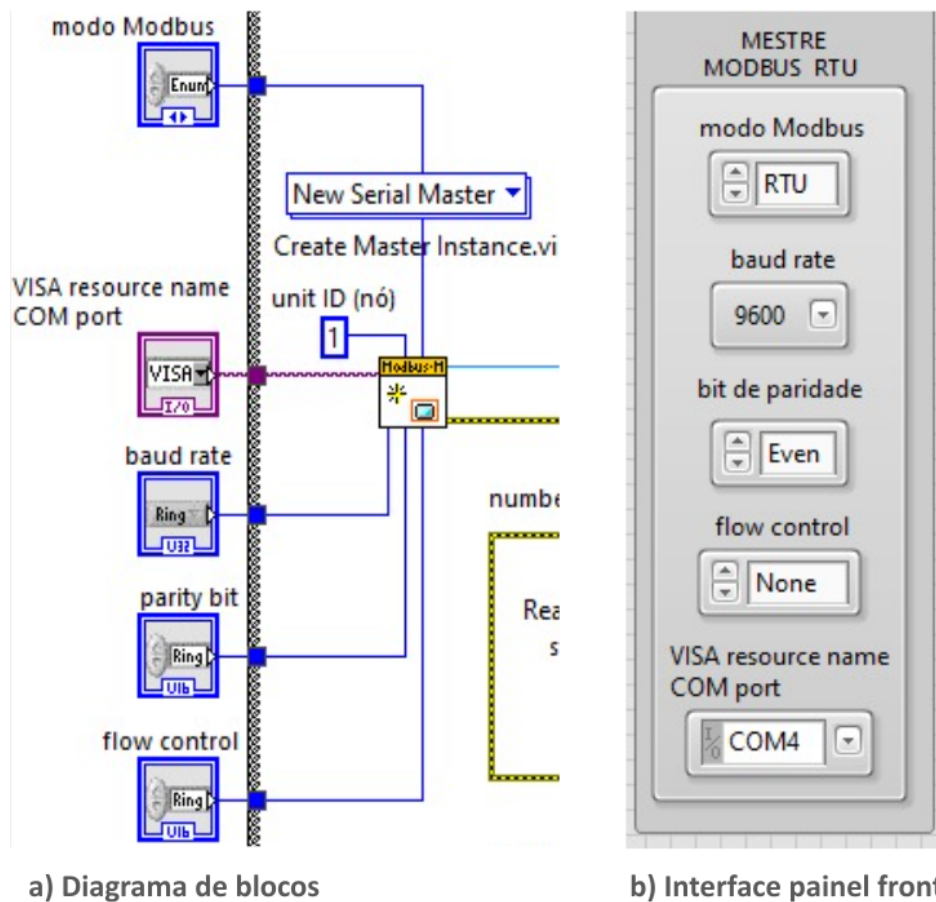
A interface espelha as entradas e saídas do diagrama de blocos implementado no Labview. O diagrama roda em loop por meio de um bloco de função *while*. Dentro do loop há um bloco *case* que estabelece as condições para iniciar a comunicação do mestre com os nós escravos e que alterna as requisições de comunicação entre os escravos, conforme o fluxograma apresentado na Figura 40 do capítulo Materiais e Métodos.

Para cada requisição de comunicação é necessário criar uma instância mestre da rede Modbus. Como entradas, o bloco mestre pede a configuração dos parâmetros de comunicação apresentados no Quadro 10, com o modo de operação do protocolo Modbus (RTU), o número do identificador único do nó do escravo, a taxa de transmissão de dados (bps), o tipo de paridade (par, ímpar ou sem paridade), o tipo de controle de fluxo e a porta de comunicação serial COM do notebook com os dispositivos da rede, conforme a Figura 48.

Pela interface é habilitado o controlador na chave *Run* e a temperatura de referência (*SP*) é escrita a cada ciclo de comunicação com o controlador PID, conforme a Figura 49. Um LED representa o acionamento da saída de controle a relé do controlador (I/O2).

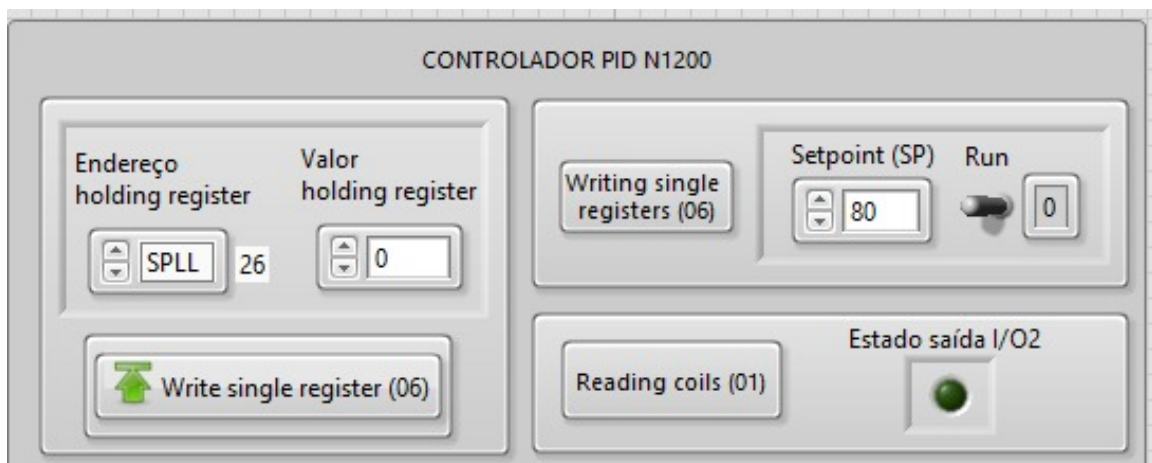
Os parâmetros de leitura do multimetro e do controlador são constantemente requisitados para os escravos e atualizados na interface dentro do bloco *case*. Para configuração dos parâmetros de escrita do controlador PID (Figura 50) foi utilizada uma variável de seleção dos parâmetros, um campo de preenchimento do dado numérico e um botão *Write* que realiza a escrita do parâmetro no dispositivo (Figura 49).

Figura 48 – Diagrama de blocos do mestre da rede Modbus RTU para comunicação com o escravo 1 (multimedidor M-200)



Fonte: Autor (2024).

Figura 49 – Interface para alteração e escrita dos parâmetros do controlador PID

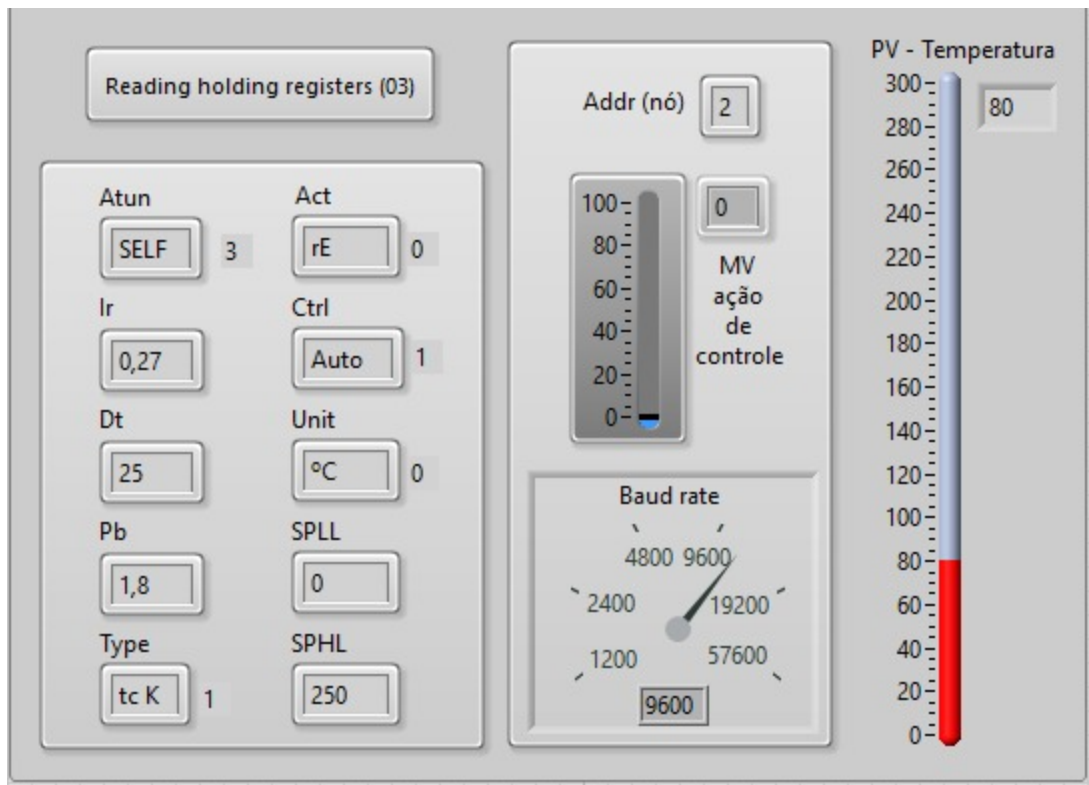


Fonte: Autor (2024).

Todos os parâmetros configurados no controlador PID N1200 por escrita de registradores pela interface são apresentados no Quadro 12.

Os sinais elétricos e parâmetros de consumo de energia obtidos durante a

Figura 50 – Parâmetros lidos e escritos do controlador PID N1200



Fonte: Autor (2024).

Quadro 12 – Configuração dos parâmetros do controlador PID N1200

Parâmetro	Descrição	Valor	Comentário
<i>Type</i>	Tipo do sensor	<i>tcK</i>	Termopar tipo K
<i>Unit</i>	Unidade de temperatura	<i>C</i>	Celsius
<i>Ctrl</i>	Modo de controle	<i>Auto</i>	Automático
<i>Atun</i>	Auto-tune dos parâmetros PID	<i>RSELF</i>	Sintonia
<i>Act</i>	Ação de controle	<i>rE</i>	Ação reversa
<i>Baud</i>	Baud rate da comunicação serial	9.6	kbps
<i>Prty</i>	Paridade da comunicação serial	<i>Even</i>	Par
<i>Addr</i>	ID único do nó	2	Nó 2 da rede
<i>SPLL</i>	Limite mínimo do setpoint	0	°C
<i>SPKL</i>	Limite máximo do setpoint	250	°C
<i>Run</i>	Habilita as saídas de controle	<i>Yes</i>	Saídas habilitadas

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

comunicação com o multimedidor são apresentados na Figura 51.

O Quadro 13 apresenta os registradores do controlador PID N1200 com valores monitorados e configuráveis pela interface e o Quadro 14 os registradores do multimedidor M-200.

Figura 51 – Parâmetros lidos do multimetror M-200

MULTIMEDIDOR M-200

Reading holding registers (03)		Reading input registers (04)	
Unit ID (nó)	1	Tensão fase A	0
Modo (16 ou 32b)	short 0	Corrente fase A	0
Formato dado	8-E-1 2	Pot aparente fase A	0
Polaridade sensor	(-) 1	FP fase A	NaN
Freq nominal	60 hz 1	Pot ativa fase A	0
Freq instântanea	0	Pot reativa fase A	0
Tipo do sistema	sistema 01 0	Energia total kWh	0,0012

Reset

Baud rate

1200 2400 4800 9600 19200 57600

9600

Fonte: Autor (2024).

Quadro 13 – Quadro de registradores do controlador PID N1200

Holding Registers (16 bits)	Parâmetro	Descrição	Valor/Unidade
0000	<i>SP</i>	Setpoint de controle (referência)	(°C)
0001	<i>PV</i>	Variável do processo	(°C)
0002	<i>MV</i>	Variável manipulada da saída de controle	(%)
0011	<i>Ir</i>	Parâmetro integral	(s)
0012	<i>Dt</i>	Parâmetro derivativo	(s)
0013	<i>Pb</i>	Parâmetro proporcional	(%)
0026	<i>SPLL</i>	Limite mínimo do setpoint	25 (°C)
0027	<i>SPHL</i>	Limite máximo do setpoint	0 (°C)
0043	<i>Type</i>	Tipo do sensor de entrada	1 - <i>tcK</i>
0044	<i>Addr</i>	Endereço do nó da rede	2
0045	<i>Baud</i>	Baud rate	3 - 9.6 (kbps)
0046	<i>Ctrl</i>	Modo de controle	1 - <i>Auto</i>
0047	<i>Run</i>	Habilita controle	1 - <i>Yes</i> 0 - <i>No</i>
0048	<i>Act</i>	Ação de controle	0 - <i>rE</i>
0049	<i>Atun</i>	Habilita sintonia dos parâmetros PID	4 - <i>RSELF</i>
0067	<i>Unit</i>	Unidade de temperatura	0 - °C
Coil Status (1 bit)	Parâmetro	Descrição	Valor
1	Saída I/O2	Estado saída 2	0 - inativa 1 - ativa

Fonte: Adaptado de NOVUS (2021b).

Quadro 14 – Quadro de registradores do multimedidor M-200

Holding Registers <i>Short (16 bits)</i>	Descrição	Valor/Unidade
0	Endereço de rede	1
1	Modo Modbus 32 bits	0 - <i>Short</i>
4	Baud Rate	5 - 9600 (bps)
5	Frequência nominal	1 - 60 (Hz)
14	Tipo de conexão do sistema	0 - sistema 01
17	Polaridade sensor I1	0 - Direto (+) 1 - Reverso (-)
21	Formato dos dados	2 - 8 - E - 1
Input Registers <i>Short (16 bits)</i>	Descrição	Valor/Unidade
4	Tensão fase A	(V)
12	Corrente fase A	(A)
28	Fator de potência fase A	
44	Potência ativa fase A	(W)
52	Potência reativa fase A	(VAr)
60	Potência aparente fase A	(VA)
66	Frequência instantânea	(Hz)
300	Energia ativa total	(kWh)
Coil (1 bit)	Descrição	Valor/Unidade
50	Reset energia	1/0 - on/off
51	Reset demanda	1/0 - on/off
52	Reset estatísticas	1/0 - on/off

Fonte: Adaptado de IMS (2015).