

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Marllon Lucas de Bessa

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA
MULTIPONTO NÃO INVASIVO APLICADO NA GESTÃO DE
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA UNIDADE
INDUSTRIAL



Divinópolis

2022

Marllon Lucas de Bessa

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA
MULTIPONTO NÃO INVASIVO APLICADO NA GESTÃO DE
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA UNIDADE
INDUSTRIAL

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado de Graduação em Enge-
nharia Mecatrônica como parte dos requisitos exi-
gidos para a obtenção do título de Engenheiro Me-
catrônico.

Eixo de Formação: Eletrônica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Alan Mendes Marotta

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Habib Bechelane
Maia



Divinópolis

2022

Monografia intitulada “Desenvolvimento de um sistema de telemetria multiponto não invasivo aplicado na gestão de consumo de energia elétrica em uma unidade industrial”, de autoria do(as) graduando(as) Marlton Lucas de Bessa, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Alan Mendes Marotta

Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva

Prof. Me. Marlon Henrique Teixeira

Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica

Prof. Dr. Marlon Antônio Pinheiro

Divinópolis

Julho de 2022

A MINHA FAMÍLIA E A MINHA NA-
MORADA QUE SEMPRE ME APOIA-
RAM NESSA JORNADA. ESSA CON-
QUISTA É NOSSA!

Agradecimentos

Agradeço,

a minha família por todos os ensinamentos e por fornecerem todos os meios necessários para o meu desenvolvimento pessoal e profissional, mantendo um lar aconchegante e respeitoso;

a minha namorada, Marina, por estar comigo em todos os momentos difíceis ao longo desses anos de graduação e com muito amor e carinho tornar esse desafio um pouco mais suportável;

ao Prof. Alan e Prof. Eduardo por não pouparem esforços em me fornecer todo o suporte necessário para realização deste trabalho;

ao meu admirado amigo Alysson Aurélio, pelas longas discussões sobre os mais diversos temas, sugestões e correções no meu trabalho, e, principalmente, ao célebre bordão: "Isso vai ser divertido!";

ao meu primo, Guilherme, por ser um exemplo de determinação e me apresentar o caminho que venho trilhando dia após dia;

aos demais colegas da turma de 2016, aos amigos da Turma 8 e todos que de alguma maneira contribuíram para minha formação, e, principalmente para a minha transformação na pessoa que sou hoje, serei eternamente grato a cada pessoa que me incentivou em cada momento em que pensei em desistir.

Comece fazendo o que é necessário, depois o que
é possível, e de repente você estará fazendo o im-
possível.

São Francisco de Assis

Resumo

A energia elétrica é o principal insumo para a manutenção da sociedade no século XXI e está presente em todas as esferas da sociedade moderna. Já nessa década, o consumo de energia elétrica no Brasil registrou um aumento de aproximadamente 12% em um panorama geral, com a indústria representando 35% da demanda energética. Além disso, a energia elétrica está envolvida na grande maioria dos processos industriais e reflete em torno de 40% dos custos de produção, logo, tornou-se relevante a ponto de atuar como um termômetro para a atividade industrial. Dessa forma, gerir esse recurso é imprescindível para a redução de custos e sustentabilidade da competitividade da indústria, com isso, se vê necessário a aplicação de técnicas para a avaliação do consumo e de gestão estratégica para a tomada de decisões. Porém, para que a gestão seja eficaz é necessário assegurar que os dados possuam alta confiabilidade, sendo necessário o emprego de técnicas de telemetria. Assim sendo, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de telemetria multiponto, por meio de uma malha de sensores de corrente SCT013, direcionado para a aquisição de dados relacionados com o consumo de energia elétrica e potência das instalações. Desse modo, será possível controlar o fluxo de informações através de uma rede de comunicação industrial do tipo *Devicebus* e visualizar os dados em uma interface *Windows Forms* implementada em uma aplicação para computador. Esse sistema possibilita ao gestor elaborar medidas de otimização para o consumo de energia elétrica e para a produção da planta industrial.

Palavras-chave: Telemetria, Redes Industriais, Telecomunicações, Instrumentação, SGE.

Abstract

Electricity is the main input for the maintenance of society in the 21st century and is present in all spheres of modern society. In this decade, electricity consumption in Brazil recorded an increase of approximately 12% in a general panorama, with the industry representing 35% of the energy demand. In addition, electricity is involved in the vast majority of industrial processes and reflects around 40% of production costs, so it has become relevant to the point of acting as a thermometer for industrial activity. Thus, managing this resource is essential for the reduction of costs and sustainability of the competitiveness of the industry, with this, it is necessary to apply techniques for the evaluation of consumption and strategic management for decision-making. However, for the management to be effective, it is necessary to ensure that the data have high reliability, requiring the use of telemetry techniques. Therefore, this work presents the development of a multipoint telemetry system, through a SCT013 current sensor's mesh, aimed at the acquisition of data related to the electrical energy consumption and power of the installations. In this way, it will be possible to control the flow of information through an industrial communication network of the DeviceBus type and visualize the data in a Windows Forms interface implemented in a computer application. This system allows the manager to develop optimization measures for the consumption of electricity and for the production of the industrial plant.

Keywords: Telemetry, Industrial Networks, Telecommunications, Instrumentation, SGE.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Definição do problema	5
1.2	Motivação	5
1.3	Objetivos do trabalho	6
1.3.1	Objetivos Gerais	6
1.3.2	Objetivos Específicos	6
1.4	Estado da Arte	6
1.5	Organização do texto	7
2	Fundamentos	9
2.1	Revisão Bibliográfica	9
2.2	Fundamentação Teórica	13
2.2.1	Transformadores de Corrente	13
2.2.2	Sensor de corrente não invasivo SCT013	14
2.2.3	ATmega328P	15
2.2.4	Telemetria	16
2.2.5	SCADA	17
2.2.6	Redes Industriais de Comunicação	19
2.2.6.1	Fragmentação das Redes Industriais	21
2.2.6.2	Topologia de redes	22
2.2.6.3	Protocolo <i>Modbus</i>	24
2.2.6.4	Meios físicos de transmissão	25

2.2.7	ESP32	27
2.2.8	Comunicação <i>Wireless</i>	27
2.2.9	Visual Studio	29
2.2.9.1	.NET Framework	29
3	Desenvolvimento	31
3.1	Funcionalidades	31
3.2	Materiais e Métodos	32
3.2.1	Módulo de aquisição de dados	32
3.2.2	Dispositivo escravo	37
3.2.3	Rede de Comunicação industrial	38
3.2.3.1	Meio físico	39
3.2.4	Dispositivo Mestre	39
3.2.5	Supervisório	39
3.2.6	<i>Softwares</i>	40
3.3	Protótipo	42
3.3.1	Módulo de aquisição de dados	42
3.3.1.1	Calibração do sensor	43
3.3.2	Dispositivo escravo	48
3.3.3	Protocolo de Comunicação	49
3.3.3.1	Meio físico	54
3.3.4	Dispositivo mestre	55
3.3.5	Comunicação <i>Wireless</i>	55
3.3.6	Supervisório	58
3.3.7	Montagem	62
3.4	Testes	62
3.4.1	Simulações	62
3.4.2	Testes do protótipo	63
4	Resultados e Discussões	67
4.1	Módulo de aquisição de dados	67
4.2	Comunicação Mestre/Escravo	69
4.3	Supervisório	72
4.3.1	Inicialização	72

4.3.2	Apresentação dos dados em tempo real	73
4.3.3	Histórico e arquivo de dados	77
5	Considerações Finais	81
5.1	Conclusões	81
5.2	Propostas de continuidade	83
5.3	Orçamento	84
	Referências	85
	A Algoritmos implementados	91
	B Vídeo demonstrativo	93

Lista de figuras

Figura 1.1 – Comparativo entre demanda contratada, demanda registrada e consumo. Fonte: (BRASIL, 2015)	3
Figura 1.2 – Comparativo entre um contrato <i>Flat</i> , Sazonalizado e o consumo real. Fonte: (ELÉTRICA, 2022)	3
Figura 2.1 – Representação simplificada de um sistema de controle e monitoramento de energia elétrica conectado a aos sistemas de gestão empresarial. Fonte: Berger e Iniewski (2012)	13
Figura 2.2 – Representação simplifica de um transformador de corrente tipo janela. Fonte: J. M. Filho (2005)	14
Figura 2.3 – Detalhes técnicos do sensor SCT013-000. Fonte: YHDC (2014)	15
Figura 2.4 – Detalhes técnicos do ATMEGA328P. Fonte: ATMEL (2008)	16
Figura 2.5 – Em destaque, o esquemático de uma unidade remota de telemetria. Fonte: Anderson (2018)	17
Figura 2.6 – Exemplo de múltiplas IHMs conectadas a uma barramento Modbus, formando um sistema SCADA. Fonte: Moraes e Castrucci (2010).	18
Figura 2.7 – Exemplo de um supervisório/SGE aplicado na gestão de energia elétrica em uma subestação.. Fonte: Berger e Iniewski (2012).	18
Figura 2.8 – Ciclo de operação por <i>polling</i> . Fonte: Lugli e Santos (2012)	19
Figura 2.9 – Exemplo de uma rede industrial com comunicação RS485. Fonte: G. F. Filho (2014)	20

Figura 2.10–Organograma de um sistema de automação industrial. Fonte: G. F. Filho (2014)	22
Figura 2.11–Ligaçao em anel. Fonte: Fourozan (2007)	23
Figura 2.12–Ligaçao em estrela. Fonte: Fourozan (2007)	23
Figura 2.13–Ligaçao em barramento. Fonte: Fourozan (2007)	24
Figura 2.14–Modelo de mensagem para padrão <i>Modbus RTU</i> . Fonte: (BORGES, 2007)	25
Figura 2.15–Comparativo entre os padrões RS 232, RS 422 e RS 485 . Fonte: (FILHO, G. F., 2014)	25
Figura 2.16–Estruturas <i>Full-Duplex</i> e <i>Half-Duplex</i> . Fonte: (KUGELSTADT, 2021)	26
Figura 2.17–Exemplo para cabo de comunicação RS485. Fonte: (KUGELSTADT, 2021)	27
Figura 2.18–Esquemático do ESP32. Fonte: (ZIMERMANN, 2020)	28
Figura 2.19–Organograma da plataforma .NET. Fonte:(THAI; LAM, 2002)	30
Figura 3.1 – Fluxograma do projeto.Fonte: elaborado pelo autor.	32
Figura 3.2 – Sinal gerado no circuito secundário. Fonte: elaborado pelo autor.	34
Figura 3.3 – Representação de um circuito divisor de tensão. Fonte: elaborado pelo autor.	35
Figura 3.4 – Esquemático do circuito projetado. Fonte: elaborado pelo autor.	37
Figura 3.5 – Esquemático da plataforma Arduino Nano. Fonte: (DIYIOT, 2021)	38
Figura 3.6 – Módulo Conversor RS485 para Arduino. Fonte: (FILIPEFLOP, 2021)	39
Figura 3.7 – Comunicação <i>wireless</i> . Fonte: Elaborado pelo autor	40
Figura 3.8 – Protótipo elaborado para validação do sistema aqui projetado. Fonte: Acervo pessoal do autor.	42
Figura 3.9 – Módulo de aquisição de dados. Fonte: Elaborado pelo autor.	43
Figura 3.10–Placas construídas para o circuito de aquisição de dados. Fonte: Acervo pessoal do autor.	44
Figura 3.11–Montagem do circuito para a calibração do módulo de aquisição de dados. Fonte: Acervo pessoal do autor.	45
Figura 3.12–Curva obtida através da regressão linear realizada. Fonte: Elaborado pelo o autor.	46

Figura 3.13–Comparativo entre o valor medido e o valor real. Fonte: Elaborado pelo o autor.	47
Figura 3.14–Curvas de histerese. Fonte: Elaborado pelo o autor.	47
Figura 3.15–Esquemático da montagem do dispositivo de campo. Fonte: Elaborado pelo o autor.	49
Figura 3.16–Fluxograma de funcionamento do código. Fonte: Elaborado pelo autor.	50
Figura 3.17–Esquemático da montagem do barramento de comunicação industrial. Fonte: Elaborado pelo o autor.	55
Figura 3.18–Esquemático da montagem do dispositivo mestre. Fonte: Elaborado pelo o autor.	56
Figura 3.19–Comunicação web através de uma rede LAN. Fonte: Engineers (2022).	57
Figura 3.20–Página HTTP apenas para troca de dados. Fonte: Acervo pessoal do autor.	57
Figura 3.21– <i>Toolbox</i> . Fonte: Arcevo pessoal do autor.	59
Figura 3.22–Fluxograma de operação do código do supervisório. Fonte: Arcevo pessoal do autor.	60
Figura 3.23–Aplicação desenvolvida e nomeada como <i>Bessa Energy Monitor</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	61
Figura 3.24–Fonte YwRobot MB-V2. Fonte: YWROBOT... (2013)	62
Figura 3.25–Rede de comunicação simulada construída em um <i>software</i> de simulação de circuitos eletrônicos. Fonte: Elaborado pelo autor.	63
Figura 3.26–Configurando o terminal de leitura para validar os dados da rede de comunicação do protótipo: Acervo pessoal do autor.	64
Figura 3.27–Descobrindo a porta COM do microcontrolador conectado ao computador. Fonte: Acervo pessoal do autor.	65
Figura 3.28–Protótipo energizado. Fonte: Acervo pessoal do autor.	65
Figura 4.1 – Corrente elétrica alternada demandada por uma carga equivalente a 560W.	68
Figura 4.2 – Comandos de escrita para o escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor. . .	69
Figura 4.3 – Comando executado pelo escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor. . .	69
Figura 4.4 – Comandos de escrita para o escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor. . .	70
Figura 4.5 – Comando executado pelo escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor. . .	70

Figura 4.6 – Comandos para inativar uma saída no escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor.	70
Figura 4.7 – Comandos para inativar uma saída no escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor.	71
Figura 4.8 – Comando de leitura e resposta do escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor.	71
Figura 4.9 – Comando de leitura e resposta do escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor.	71
Figura 4.10–Inicialização do aplicativo <i>Windows</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	73
Figura 4.11–Mensagens de erros possíveis durante a inicialização. Fonte: Elaborado pelo autor.	74
Figura 4.12–Mensuração de duas cargas resistivas de 1000W e 2000W. Fonte: Elaborado pelo autor.	75
Figura 4.13–Mensuração de duas cargas resistivas de 800W e 1600W. Fonte: Elaborado pelo autor.	75
Figura 4.14–Comparação entre os sensores. Fonte: Elaborado pelo autor.	76
Figura 4.15–Mensuração com uma carga indutiva. Fonte: Elaborado pelo autor.	76
Figura 4.16–Histórico de dados de potência e consumo energético para a data de 09 de Julho. Fonte: Elaborado pelo autor.	78
Figura 4.17–Histórico de dados de potência e consumo energético para a data de 11 de Julho. Fonte: Elaborado pelo autor.	78
Figura 4.18–Mensagens de erros para a busca no histórico. Fonte: Elaborado pelo autor.	79
Figura 4.19–Arquivo de armazenamento de dados. Fonte: Elaborado pelo autor.	79

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Especificações do Sensor SCT013-000. Fonte: (YHDC, 2014)	15
Tabela 3.1 – Média dos dados para a curva de linearidade.	46
Tabela 3.2 – Dados para a curva ascendente da histerese.	48
Tabela 3.3 – Dados para a curva descendente da histerese.	48
Tabela 3.4 – Conexões do dispositivo escravo.	50
Tabela 3.5 – Padronização do pacote do dados <i>software</i>	51
Tabela 3.6 – Endereços utilizados para os dispositivos escravos.	51
Tabela 3.7 – Menu de comandos para os escravos.	52
Tabela 3.8 – Conexões do dispositivo mestre.	56
Tabela 4.1 – Testes realizados para aferição de potência e corrente consumida. . . .	67
Tabela 4.2 – Resumo dos resultados obtidos.	77
Tabela 5.1 – Orçamento estimado para o desenvolvimento do projeto.	84

Lista de acrônimos e notações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CI	Círculo Integrado
CLP	Controlador Lógico Programável
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERP	Enterprise Resource Planning
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
HART	Higway Addressable Remote Transducer
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês: Integrated Development Environment
IEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IHM	Interface Homem-Máquina
IP	Protocolo da Internet, do inglês: Internet Protocol
IoT	Internet-of-Things
ISO	International Standards Organization

ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
MDF	Medium Density Fiberboard
PDCA	Planejar Fazer Chegar Agir, do inglês: PLAN -DO-CHECK-ACT
PML	Produção Mais Limpa
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica
PWM	Modulação por largura de pulso, do inglês: Pulse Width Modulation
QDC	Quadro de Distribuição de Circuitos
RTU	Unidade Remota de Telemtria, do inglês: Remote Telemetry Unit
SCADA	Supervisory Control and DATA Acquisition
SGE	Sistema de Gestão de Energia
TC	Transformador de Corrente
TCP	Protocolo de controle de transmissão, do inglês: Transmission Control Protocol
TTL	Lógica Transistor-Transistor do inglês: Transistor-Transistor Logic
Wi-Fi	Wireless Fidelity

Capítulo 1

Introdução

Desde meados dos séculos XIX e XX, a energia elétrica transformou o cenário fabril mundial, sendo o principal catalisador para a Segunda Revolução Industrial, como a principal fonte de energia em conjunto com o petróleo neste período (DATHEIN, 2003). A partir desse momento, a energia elétrica se tornou um insumo essencial para os avanços tecnológicos e sustentabilidade da indústria. Perante a isso, o seu consumo é utilizado como um termômetro para mensurar a atividade industrial, já que, atualmente esse setor é o principal usufruidor no Brasil, demandando 35% da energia produzida no Brasil (EPE, 2021).

A energia elétrica está presente na maioria dos processos em uma indústria, desde as áreas administrativas que necessitam de ferramentas computacionais para operarem até os setores produtivos onde o maquinário e as linhas de produção demandam grandes proporções dessa utilidade. Logo, ao fim do mês a fatura da concessionária de energia denota um valor expressivo para as despesas da organização. Segundo a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN, 2017), os gastos com energia elétrica podem representar até 40% dos custos de produção.

Seguindo adiante, os consumidores do setor elétrico podem ser classificados em dois grandes grupos denominados A e B. O primeiro se refere aos consumidores em Alta e Média Tensão, compostos geralmente pelo setor industrial e grandes redes de comércio como Shopping Centers. Já o segundo grupo são clientes da rede de Baixa Tensão, formados por residências, comércio popular, rede rural, dentre outros. Os clientes que se enquadram no grupo B são incluídos na tarifa monômia, ou seja, pagam apenas pela quantidade de energia consumida, já os clientes do grupo A são cobrados tanto pela quantidade de

energia consumida quanto pela demanda prévia das suas instalações. Além disso, esse grupo também pode adotar pela cobrança de valores diferentes para o consumo de energia elétrica praticado em kWh conforme o horário (PROCEL, 2001). Para o grupo A também é oferecida a possibilidade de adotar a modalidade horo-sazonal, onde o valor da tarifa é determinado pelo horário de consumo. Essas tarifas são denominadas Tarifas Verde e Azul e são estipuladas através da Resolução Normativa da ANEEL (CEMIG, 2011).

Em grande parte, o grupo A está integrado ao Mercado Livre de Energia, onde existe a possibilidade de contratar fornecedores presentes em todo território nacional. O setor industrial é o principal cliente e detém 83% da energia elétrica comercializada nesse mercado (EPE, 2021), ressaltando novamente a dependência das fontes energéticas para a indústria como um todo.

Além dos grupos A e B, existem outras possibilidades de contrato para o fornecimento de energia elétrica através do Mercado Livre de Energia Elétrica. Esse consiste em um ambiente onde determinada empresa pode contratar e negociar o fornecimento de energia elétrica através de qualquer concessionária de energia que integre este mercado, independente da sua localização. A medição de consumo acontece de forma semelhante ao modelo anterior, onde é contratada a demanda (kW) referente a potência das instalações industriais e realizado o pagamento sobre o consumo mensal (kWh) (ELÉTRICA, 2022).

O conceito de demanda precisa estar bem definido, pois, é um dos pontos primordiais em um contrato de fornecimento de energia elétrica. A demanda é a potência instantânea drenada em uma instalação industrial, ou seja, é referente ao pico de potência máximo que as instalações vão drenar da rede de distribuição de energia elétrica. É importante que este valor seja muito bem definido, pois todo o projeto da rede de distribuição de energia elétrica é realizado através da demanda de seus consumidores(BRASIL, 2015). Logo, em uma situação onde a demanda contratada é ultrapassada diversas vezes pode resultar na desenergização de uma área devido a atuação dos dispositivos de segurança, e em casos mais graves pode acarretar danos aos condutores e equipamentos presentes na rede elétrica. O cálculo da demanda por parte do gestor deve levar em consideração todas as singularidades da planta industrial, tais como o perfil de operação dos setores, a concomitância dos equipamentos energizados, dentre outros fatores. Na Figura 1.1 é possível visualizar um esquemático relacionando demanda contratada, demanda registrada e consumo de energia elétrica.



Figura 1.1 – Comparativo entre demanda contratada, demanda registrada e consumo.

Fonte: (BRASIL, 2015)

O Mercado Livre de Energia Elétrica classifica os seus clientes em dois modelos: Consumidores Especiais e Consumidores Livres. Os Consumidores Especiais são aqueles que possuem uma demanda contratada entre 500 kW até 1500 kW , já os Consumidores Livres possuem demandas de energia superior a 1500 kW . Além disso, ainda existem dois tipos de contratos para cada consumidor: Contrato *Flat* e Contrato Sazonalizado. No Contrato *Flat* é sempre disponibilizada a mesma quantidade de energia elétrica para o consumidor, já no Contrato Sazonalizado o quantitativo de energia elétrica disponibilizado segue o perfil de consumo da unidade. Logo, existem diversas modalidades nas quais uma indústria pode ser enquadrada e definir o melhor contrato de fornecimento de energia elétrica, é uma tarefa árdua e extremamente importante para a saúde financeira da empresa (ELÉTRICA, 2022).

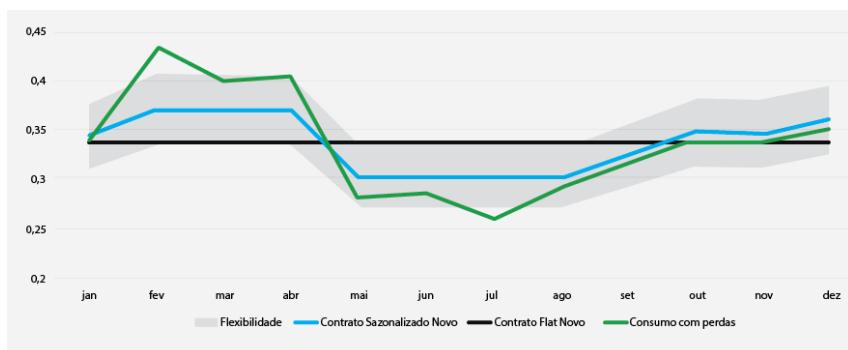


Figura 1.2 – Comparativo entre um contrato *Flat*, Sazonalizado e o consumo real.

Fonte: (ELÉTRICA, 2022)

Conforme introduzido nos parágrafos anteriores, os custos com energia elétrica representam uma grande fatia do orçamento em uma empresa, o que gera impacto direto na competitividade dos seus produtos. Então, as informações relacionadas ao perfil energé-

tico das instalações industriais são estratégicas para a gestão empresarial. Isso é reforçado quando são analisados os fundamentos básicos da gestão estratégica, como, por exemplo, o que é dito por Sambiasi, Klement e Barbosa (2017), segundo o qual para exercer o controle estratégico dos recursos é necessário ao gestor conhecer profundamente as capacidades produtivas e recursos pertinentes à empresa. Sambiasi, Klement e Barbosa (2017) também complementam essa linha de racionamento exemplificando que é necessário evitar que a organização esteja suscetível aos ataques do mercado, antecipando suas ações em relação aos seus concorrentes. Estes dois casos denotam o quanto é importante a alocação correta dos recursos para a saúde financeira da empresa, e como a energia elétrica representa em torno de 40% das despesas fixas, dessa forma, a gestão inteligente é indispensável para a manutenção da saúde financeira da instituição. Além do que, apenas através da administração dos recursos é possível conhecer qual das múltiplas formas tarifárias melhor se enquadram para a organização, isso é reforçado por CEMIG (2011) onde é extraído o seguinte trecho: "A busca por um preço médio deve ser um desafio constante".

Atualmente, existem diversas ferramentas disponíveis no mercado para o gerenciamento do consumo de energia em uma planta industrial. Porém, esses métodos estão alicerçados principalmente em *softwares* que realizam uma análise geral da energia elétrica consumida. Nos casos de dispositivos mais completos que realizam a submedição é necessário dispor de um montante significativo, pois será necessário contratar uma empresa para desenvolver uma solução personalizada.

Tendo em vista os fatores descritos acima, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo para realizar a telemetria do consumo de energia elétrica em diversos pontos de uma planta industrial, fornecendo, assim, um perfil completo do consumo de energia elétrica da empresa a partir da análise de cada setor ou maquinário. Este projeto possui como premissa o fato de utilizar um sensor de corrente não invasivo e realizar a comunicação sem fio com o operador, sendo assim possível consultar os dados remotamente. O sistema inicia através da implementação de um sensor de corrente do tipo não invasivo no cabo de alimentação do maquinário ou setor. Em conjunto ao sensor é aplicado um módulo para aquisição e conversão dos dados. O módulo por sua vez se conecta a um barramento de comunicação seguindo os moldes dos protocolos *Sensorbus* e *Devicebus*, como o *ModBus*. Já o meio físico irá operar conforme o padrão RS-485,

as informações de consumo de cada ponto serão reportadas para um dispositivo mestre em campo, responsável por lançar os dados para um computador através de uma conexão *wireless*. O supervisório onde os dados serão expostos para o usuário será realizado através de uma rotina construída em linguagem *C#* e Windows Forms através da plataforma Visual Studio. Nessa aplicação será possível identificar o consumo de energia elétrica em cada ponto da unidade e também o perfil geral em toda instalação elétrica. Logo, sendo possível ao gestor definir medidas de otimização de consumo conforme o contrato de energia vigente e as características particulares de cada indústria ou comércio. Percebe-se que este projeto apresenta níveis de automação industrial, pois se trata da interconexão entre objetos através da tecnologia, formando uma rede inteligente capaz de acelerar a tomada de decisões e viabilizar a realidade da Indústria 4.0 em propostas futuras.

1.1 Definição do problema

Como explicitado na seção anterior, apesar da existência de sistemas para a medição de energia em instalações elétricas, as informações disponíveis são escassas. Geralmente, o gerente de engenharia da indústria dispõe apenas da leitura realizada pela própria concessionária, a qual fornece apenas o consumo mensurado mensalmente. Dessa forma, não é possível realizar uma gestão inteligente da energia elétrica, procurando atender aos padrões especificados em contrato.

1.2 Motivação

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho surgiu através da experiência profissional do autor como estagiário no setor de Engenharia de Projetos em uma planta industrial de grande porte, onde atuou na liderança de projetos com viés para a gestão e economia de energia. Na empresa em questão, a fatura de energia representa um montante significativo e impactava diretamente no custo dos seus produtos. Além disso, são recorrentes ocorrências que ultrapassam os valores estipulados em contrato, enquanto, em outros meses, tais grandezas estão substancialmente abaixo do esperado. Assim, é necessário realizar estimativas constantes para possíveis imprevistos.

1.3 Objetivos do trabalho

Esta seção apresenta o objetivo geral, bem como os objetivos específicos, que apresentam os passos intermediários para a conclusão do trabalho.

1.3.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um sistema de telemetria não invasivo capaz de analisar de forma fracionada o perfil de consumo de energia elétrica em uma unidade industrial, atuando como uma ferramenta para a gestão estratégica de recursos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar e validar o sensor de corrente não-invasivo a ser aplicado para a medição de energia;
- Determinar os dispositivos eletrônicos a serem utilizados, tendo em vista os modelos disponíveis;
- Determinar os protocolos de comunicação a serem utilizados para a transmissão de dados em todos os níveis do projeto;
- Implementar um sistema de armazenamento de dados do histórico de consumo medido;
- Implementar um protótipo como forma de validar o sistema projetado;
- Implementar uma interface com o usuário através de uma aplicação que forneça os dados de forma visual e agradável ao usuário;

1.4 Estado da Arte

O crescente aumento na demanda energética possibilitou o surgimento de diversas obras no intuito de promover o consumo conscientizado. Conhecer o perfil do consumidor, os detalhes técnicos dos equipamentos presentes na rede e as bandeiras tarifárias impostas é essencial para o desenvolvimento dessa metodologia. Existem diversos projetos voltados para a aquisição de dados em tempo real, oferecendo ao usuário o seu perfil de consumo. Soares (2021) apresenta um sistema não invasivo capaz de identificar quais cargas elétricas

estão ligadas a rede elétrica através da aplicação de uma rede neural. Ainda sobre esse projeto, foi aplicado o sensor de corrente SCT013 que possui característica não invasiva e grande versatilidade, apresentando crescente utilização em diversos protótipos neste campo de estudo.

Direcionando o foco para a aquisição de dados de consumo de energia elétrica, Neto (2015) utiliza técnicas de telemetria para a minimização dos erros humanos que aconteciam durante a aferição do consumo de forma manual. Porém, Neto (2015) aplica o analisador TES-3600 para obter os parâmetros da rede elétrica, que possui alto custo de aquisição e a instalação na rede necessita de domínio por parte do técnico responsável.

Em relação aos *softwares* para a análise de dados de quantificação da energia elétrica consumida, existem aplicações em órgãos governamentais, como o sistema Aguapura utilizado pelo Governo do Estado da Bahia (AGUAPURA, 2021), o qual é baseado nos conceitos de Produção Mais Limpa (PML) e apresenta ferramentas para a minimização de perdas e desperdícios, através da identificação de pontos discrepantes no perfil e da alocação da manutenção nesses locais.

Logo, percebe-se que apesar de existirem diversos trabalhos nesse sentido, o conhecimento está fragmentado cada um em sua esfera. Existe uma lacuna de projetos multidisciplinares que além de realizar a aquisição de dados também proporciona uma análise geral rápida e efetiva, ao mesmo tempo que é acessível para pequenos empreendimentos e de fácil implementação.

1.5 Organização do texto

Este documento está dividido em cinco capítulos. No presente capítulo são apresentados a definição do problema, motivação, estado da arte e objetivos para o trabalho a ser desenvolvido.

Já no segundo capítulo é apresentada a fundamentação do trabalho. Constanse neste trecho a revisão bibliográfica e o conteúdo teórico necessário para o desenvolvimento do projeto.

Na terceira parte, é discorrido sobre a metodologia. Nessa etapa é apresentada a justificativa para os métodos aplicados ao desenvolvimento do projeto.

Os resultados são apresentados no quarto capítulo deste documento. Nessa parte estão

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

dispostas e discutidos os ganhos atingidos ao longo de todo o trabalho de conclusão de curso.

Por fim, o último capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, o balanço dos objetivos alcançados e a proposta de continuidade do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Fundamentos

O desenvolvimento deste trabalho se inicia a partir da investigação dos conteúdos produzidos relacionados à aplicação da telemetria para a aquisição de informações. A seguir estão presentes primeiramente uma revisão breve do conteúdo a ser abordado e conceitos necessários para o entendimento desse trabalho.

2.1 Revisão Bibliográfica

O crescente aumento na demanda de energia elétrica proporcionou o surgimento de diversas obras direcionadas para a gestão otimizada do consumo de energia elétrica (EPE, 2021). No entanto, qualquer análise otimizada necessita de ser fundamentada em dados confiáveis, e, nesse sentido, diversas investigações foram desenvolvidas ao longo do tempo almejando alcançar informações cada vez mais precisas. Ainda no contexto da crise do petróleo culminada nas décadas de 70 e 80, surgiu no Brasil o interesse pela gestão eficiente das matrizes energéticas e, com base nisso, foi implantado o Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em uma tentativa de realizar o uso racional da energia elétrica no país (MINAS E ENERGIA, 1985). Uma das ações mais notáveis do programa é o Selo PROCEL, o qual certifica equipamentos como eletrodomésticos e motores elétricos que possuem como premissa a economia de energia. O interesse por ações que enfatizam o consumo consciente prosseguiu com a implantação de outros programas como a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2004, a qual fornece informações estratégicas sobre o consumo de energia segmentado em diversos campos ao longo de todo o país (EPE, 2021). Por enquanto, é notável que a busca por conhecimentos e informações sobre as

demandas energéticas estava vinculada a ações governamentais. Porém, com o acréscimo crescente nas tarifas aplicadas para o consumidor, o surgimento de projetos com o foco no indivíduo ou empresa foi impulsionado, isso é comprovado através dos inúmeros programas divulgados nas mídias, tais como cartilhas de conscientização e apresentam dos modelos tarifário, como por exemplo a Cartilha Energia elaborada pelo Governo Federal (BRASIL, 2015) e o Manual de Gerenciamento de Energia elaborado pelo Governo de Minas Gerais (CEMIG, 2011) .

Em 1991, Plonski, Almeida e Cury (1991) propuseram a realização da gestão industrial através de uma análise de custos. Segundo Plonski, Almeida e Cury (1991), a economia de energia na indústria pode ser obtida através de dois processos que se complementam: o desenvolvimento tecnológico aliado ao desenvolvimento das técnicas de gestão. Este artigo ainda fornece um exemplo no qual é estipulado a quantidade de energia demandada por diferentes processos aplicado a uma indústria cimenteira. Assim, percebe-se que as despesas com energia elétrica começam a influenciar nas configurações das indústrias modernas. Já Saidel, Favato e Morales (2005) fazem uma análise completa de influência das despesas em energia elétrica através de indicadores aplicados em uma instituição de ensino, correlacionando os valores despedidos com particularidades de cada local aferido.

Com isso, nota-se, que houve a agregação de diversos atributos para a gestão de energia conforme a evolução no tempo. Buscando normatizar os processos para a eficiência energética, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) disponibilizou no Brasil, em 2011, uma versão revisada da norma ISO 50001 de 2011 denominada ABNT NBR ISO 50001, a qual propõe a gestão de energia. Essa normativa é baseada em dois outros sistemas de gestão de qualidade conhecidos em todo o mundo, sendo eles o ISO 9001 e ISO 14001, oferece ferramentas para a promoção de melhores práticas de consumo energético consciente. São apresentadas ferramentas como a aplicação do ciclo PDCA, o qual se origina do inglês *Pan, Do, Check e Act*, seguida de uma versão estendida do mesmo, no qual são apresentados cinco passos para a abordagem estratégica da pauta energética (FOSSA; SGARDBI, 2015).

No entanto, todas as metodologias e orientações para a gestão eficiente dos recursos energéticos necessitam de informações confiáveis para alcançar o sucesso esperado e é neste ponto que são inseridos a telemetria para a aquisição de dados (BERGER; INIEWSKI, 2012). A terminologia da telemetria está relacionada a quaisquer dispositivos aplicados

para o sensoriamento de uma determinada variável. A telemetria data desde o início da tecnologia e, segundo Lozano-Nieto (1999), essa concepção apresenta a forma como os dados são adquiridos em uma localização remota e transmitidos para a gravação e análise em um local apropriado. Com o crescente interesse pela busca em eficiência energética na atualidade, surgiram diversos trabalhos aplicando a telemetria para a aquisição de dados de consumo no campo industrial. Um exemplo disso, é o sistema de telemetria para o monitoramento da qualidade da energia elétrica citado por Neto (2015). Nesse caso, é desenvolvida uma interface para a aquisição de dados de consumo de energia elétrica de consumidores particulares através da conexão móvel 3G, substituindo a necessidade de um operador efetuar a leitura diretamente no medidor. Ainda no âmbito residencial, foram desenvolvidos projetos semelhantes, porém aplicados para o monitoramento de outras variáveis, como o projeto desenvolvido por Schubert (2008). Nessa proposta, um protótipo é desenvolvido para a captura de dados relacionados ao consumo de água, utilizando dos mesmos artifícios, como a aplicação da comunicação *wireless* e a implementação de uma rede multiponto. Porém, foi escolhida a aplicação de microcontroladores PIC's para o processamento dos dados e gerar as informações de consumo de água.

Por fim, é necessário conectar o campo da telemetria com a gestão de energia, e para isto, as redes de comunicação são aplicadas. As redes de telecomunicação modernas iniciaram com o experimento de Claude Chappe, em 1791, no qual o pesquisador desenvolveu um telegrafo óptico (semáforo) empregando 26 sinais. O sistema de Chappe já empregava sinais codificados e estações repetidoras tais como nos tempos contemporâneos. Já no século XIX, surgiu o primeiro telégrafo tal como se popularizou, através de Samuel Thomas Soemmering. O avanço tecnológico no campo das telecomunicações ao longo do século XIX seguiu com o código Morse em 1837 por Samuel Morse, o primeiro cabo submarino de um telégrafo em 1850 e o primeiro cabo transoceânico em 1866 idealizado por Cyrus West Field (OLIVEIRA, 2012).

As primeiras tentativas de se realizar o trânsito de informações entre maquinários e o operador se deu através de sinais analógicos em meados dos anos 1960. Os sinais geralmente operavam entre 4 a 20mA e eram responsáveis por realizar a atuação de controladores eletromecânicos. A digitalização dos sinais chegou com a introdução do Controlador Lógico Programável (CLP) durante a década de 1970 (GROOVER, 2011). Em 1979, a Modcon® introduziu no mercado o primeiro protocolo digital para rede industrial

protocolo Modbus, alcançando um grande número de usuários em pouco tempo. No ano posterior, foi apresentado o protocolo *Higway Addressable Remote Transducer* (HART) pela Fisher Rosemount®. Esse sistema possui como diferencial a utilização do cabeamento tradicional para sinais analógicos, citado no início desse texto. Com o avanço da automação na indústria, surgiram modelos mais sofisticados tais como o Fieldbus elaborado pela Fieldbus Foundation. Este último se caracteriza por realizar a comunicação de forma bidirecional através de blocos "*fields*". Porém, os sistemas de controle e automação aplicado nas fábricas estavam cada vez mais elaborados e com a necessidade de transmitir informações extensas e complexas. Com o intuito de prover essa necessidade, surgiu em 1987 na Alemanha o padrão PROFIBUS através da associação de 21 companhias (LUGLI, 2010).

Com a existência de diversos modelos para realizar a comunicação, surgiu a necessidade de normatizar os processos. Logo, a *International Telecommunication Union* (ITU) (ITU, 2021), assim como a *International Standards Organization* (ISO) e a *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEE) são responsáveis por regulamentar e orientar no desenvolvimento de novos padrões de comunicação.

Por fim, a evolução nos sistemas de automação industrial resultou na integração dos dados das operações na fábrica com a gestão empresarial, acompanhando as filosofias modernas de gerenciamento de informação. Os sistemas centralizados que coletam os dados no piso de fábrica, executam o processamento dos mesmos e culminam em plataformas para o gerenciamento empresarial são denominados ERP (*Enterprise Resource Planning*), nos quais estão contidas diversos níveis de redes de comunicação (GROOVER, 2011).

Na Figura 2.1 é possível visualizar o esquema com um modelo de um sistema de gerenciamento empresarial conectado aos sistemas de automação e controle para uma subestação de energia elétrica. Isso se conecta diretamente aos propósitos do trabalho desenvolvido.

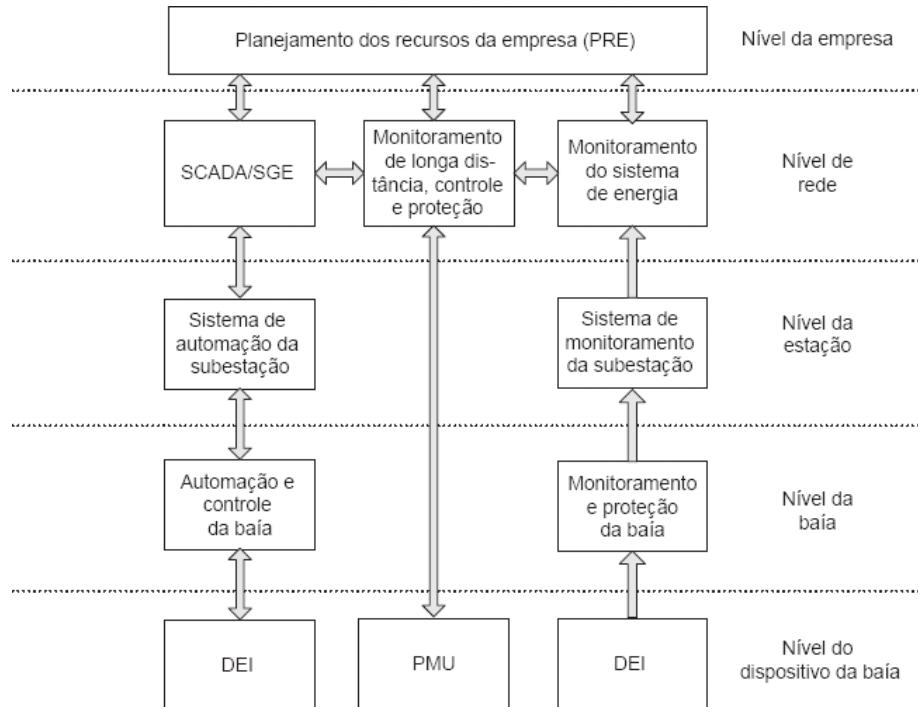


Figura 2.1 – Representação simplificada de um sistema de controle e monitoramento de energia elétrica conectado a aos sistemas de gestão empresarial. Fonte: Berger e Iniewski (2012)

2.2 Fundamentação Teórica

Nesta etapa, serão expostos os conceitos e formulações necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

2.2.1 Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente são equipamentos eletromagnéticos constituídos de essencialmente dois circuitos elétricos, denominados enrolamento primário e enrolamento secundário. Geralmente, o circuito primário é constituído pelo próprio cabo condutor no qual se deseja mensurar a corrente, com poucas espiras em torno do núcleo eletromagnético. Já o segundo circuito é responsável por realizar a transformação da corrente e dispõe de um número elevado de espiras, decrescendo a corrente aferida para grandezas seguras para serem trabalhadas pelo microprocessador (FILHO, J. M., 2005). Na Figura 2.2 é apresentada a representação esquemática de um transformador de corrente tipo janela, um modelo comumente aplicado para instrumentos como alicate amperímetro.

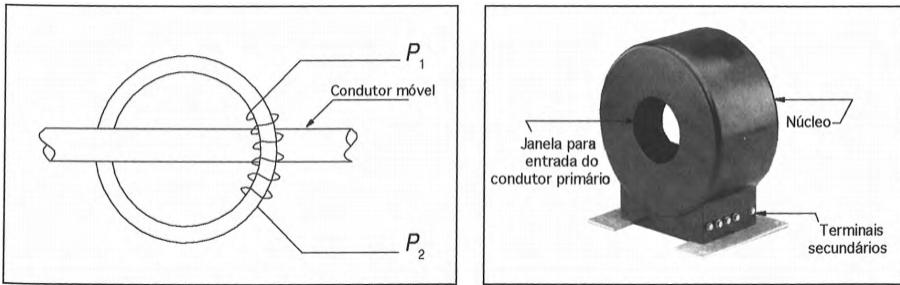


Figura 2.2 – Representação simplificada de um transformador de corrente tipo janela.

Fonte: J. M. Filho (2005)

A relação entre a corrente analisada e a corrente induzida é dada através da razão entre o número de espiras entre os enrolamentos primário(1) e secundário(2), conforme a Equação 2.1.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

O fluxo de corrente gerado nos terminais do enrolamento secundário do Transformador de Corrente (TC) só é possível devido a ocorrência do Efeito Hall. O Efeito Hall ocorre quando existe uma carga em movimento imersa em um campo magnético, a qual sofre ação da força de *Lorentz*. Em reação a isso, acontece um acúmulo de cargas no circuito secundário do material, o que resulta em uma diferença de potencial denominada potencial de Hall (AGUIRRE, 2014).

Por último, é aconselhável que os TC's operem com baixas impedâncias ligadas ao secundário, de forma a eliminar possíveis influências no processo de transformação.

2.2.2 Sensor de corrente não invasivo SCT013

Um dispositivo não invasivo é caracterizado pela capacidade de exercer sua função sem necessitar de alterações no circuito em que está inserido. O sensor de corrente SCT013 trata-se de um equipamento não invasivo, pois não necessita de modificações na rede de energia decorrentes de sua instalação. O dispositivo é constituído por um núcleo magnético e assim como um transformador, possui um enrolamento primário e secundário, sendo o segundo constituído pelo próprio condutor no qual é desejado mensurar a corrente (YHDC, 2014). Na Figura 2.3 é possível visualizar a representação esquemática desse equipamento.

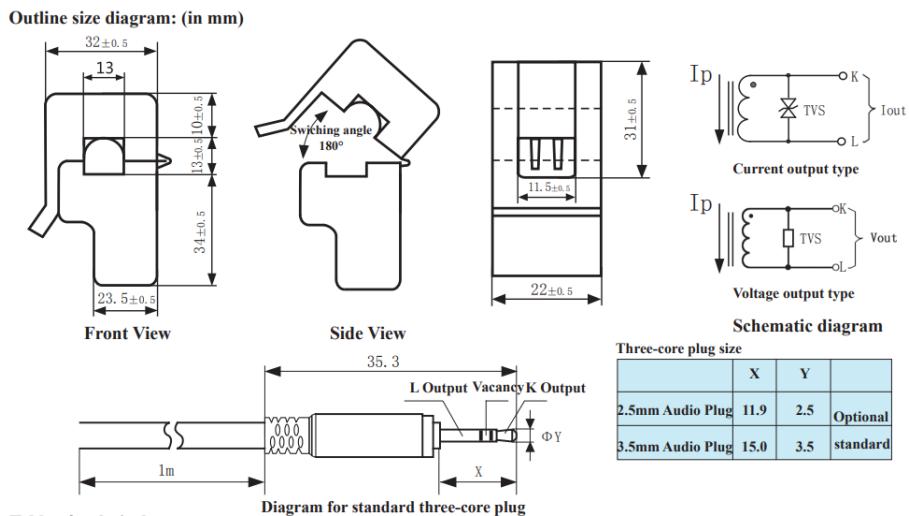


Figura 2.3 – Detalhes técnicos do sensor SCT013-000. Fonte: YHDC (2014)

Como foi dito anteriormente, o SCT013 é um transformador de corrente com razão de transformação de 1:2000, a qual é possível calcular através da Equação 2.1. Na tabela abaixo é possível observar mais alguns dados sobre o dispositivo.

Leitura	0 – 100A _{rms}	Saída	0-50mA
Não linearidade	±3%	Rigidez dielétrica AC	1000 V
Temperatura de Trabalho	-25°C a +70°C	Razão de Transformação	1:2000

Tabela 2.1 – Especificações do Sensor SCT013-000. Fonte: (YHDC, 2014)

A escolha desse sensor se deu devido à sua disponibilidade prévia, sendo de posse do orientador desse projeto. Além disso, o dispositivo cumpre os requisitos necessários para o desenvolvimento do protótipo.

2.2.3 ATmega328P

Para a realização da leitura dos dados será aplicado um microcontrolador ATmega328P. Este dispositivo eletrônico se destaca por ser o mesmo utilizado na plataforma *open-source* Arduino. O ATmega328P é um microcontrolador de 8 bits que possui 28 pinos em um encapsulamento de plástico, sendo 23 programáveis operando numa frequência de até 20MHz (LIMA, 2018). Pode-se listar os seguintes periféricos nesse encapsulamento:

- 6 canais de PWM;
- 8 conversores A/D de 10 bits;

- Interface compatível com I2C;
- Duas interfaces de comunicação serial SPI;
- Temporizador de 16 bits;
- Dois temporizadores de 8-bits;
- Entre outros.

No caso deste trabalho, serão utilizados, principalmente, as entradas analógicas para a leitura dos sinais provenientes dos sensores. Enquanto isso, os pinos digitais serão aplicados na realização da comunicação externa. Na Figura 2.4 é possível observar o *pinout* do CI Atmega328P.

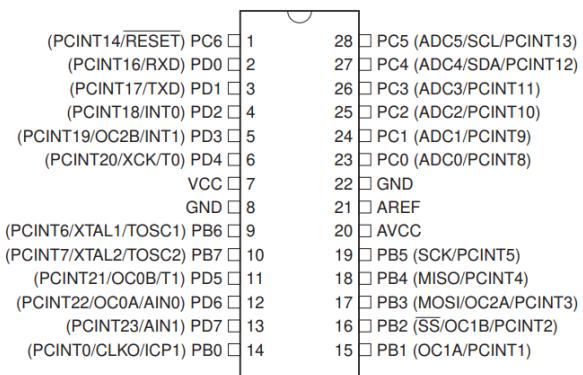


Figura 2.4 – Detalhes técnicos do ATMEGA328P. Fonte: ATTEL (2008)

2.2.4 Telemetria

O termo telemetria pode ser definido como a técnica de transmissão de dados a distância (FERREIRA, 2010). Através disso é possível afirmar que esse conceito se aplica a transferência e utilização de dados provindos de múltiplos pontos, distribuídos em torno de uma área pré-determinada, para o monitoramento, medição e controle da variável desejada. A transmissão pode ocorrer de forma cabeadas ou via rede sem fio, sendo a comunicação *wireless* um exemplo desta. No último caso, as redes são denominadas remotas de telemetria. As Unidades de Telemetria Remotas, ou *Remote Terminal Unit* em inglês, são estruturas complexas baseadas em microcontroladores responsável pela monitoração e

controle de equipamentos em campo, que por sua vez, se conecta em sistemas de supervisão, tais como sistemas SCADA, o que será apresentado na seção a seguir (ANDERSON, 2018). O diagrama com uma unidade remota de telemetria é observado na Figura 2.5.

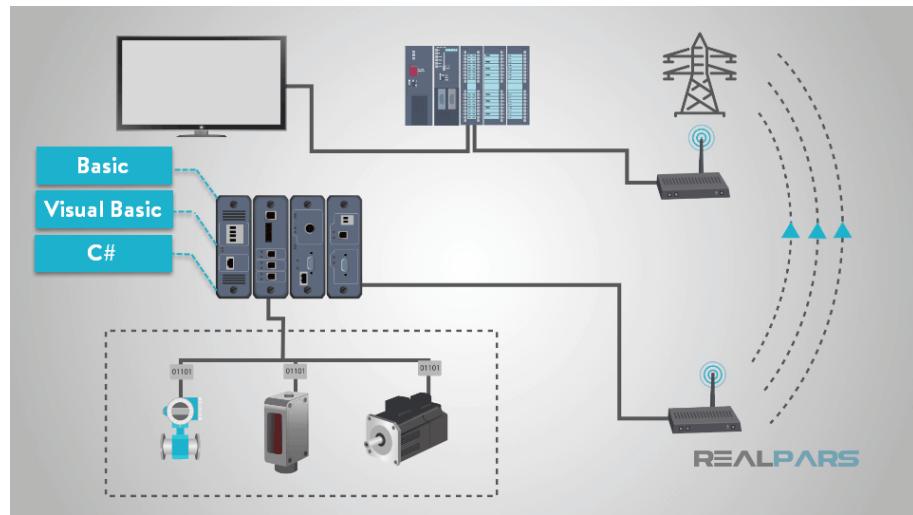


Figura 2.5 – Em destaque, o esquemático de uma unidade remota de telemetria. Fonte: Anderson (2018)

2.2.5 SCADA

A terminologia SCADA se origina do inglês do *Supervisory Control and DATA Acquisition*, ou seja, Aquisição de Dados e Controle do Supervisório. Dessa forma, já é possível perceber que os sistemas SCADAs tratam de uma forma de alto nível de obter dados e realizar o controle de equipamentos em campo (MORAES; CASTRUCCI, 2010).

Esse modelo de sistema correlaciona a integridade dos equipamentos, elementos de processo e segurança dos operadores em uma lógica centralizada. Um sistema constituído por uma IHM (Interface Homem-Máquina) e RTU (*Remote Terminal Unit*), como no caso do projeto desenvolvido neste trabalho se enquadra como um sistema SCADA, pois apresenta as características básicas do modelo (MORAES; CASTRUCCI, 2010).

Na Figura 2.6 é apresentado um fluxograma onde uma rede industrial ModBus interage com uma série de supervisórios, formando assim, um sistema SCADA.

Ainda dentro dos sistemas SCADA, existe uma classe de sistemas supervisórios chamadas Sistemas de Gestão de Energia (SGE), a qual se limita a operar no controle e aquisição de dados de consumo de energia elétrica. Os sistemas SGE clássicos possuem taxas de atualização relativamente altas se comparando com outros sistemas, devido a

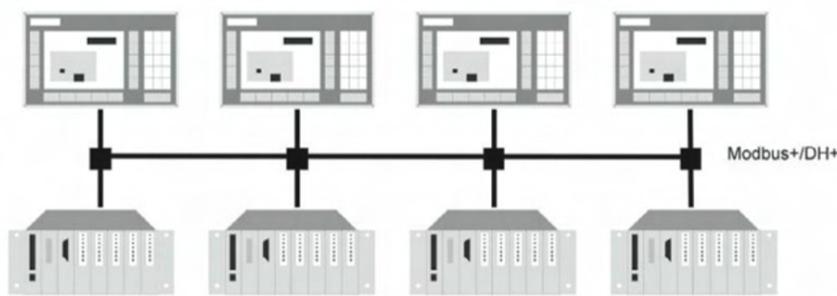


Figura 2.6 – Exemplo de múltiplas IHMs conectadas a uma barramento Modbus, formando um sistema SCADA. Fonte: Moraes e Castrucci (2010).

necessidade de colher amostragens sólidas para calcular a demanda e consumo de energia elétrica no ponto de alimentação (BERGER; INIEWSKI, 2012).

Sistemas SCADA/SGE são aplicados principalmente em subestações de energia elétrica, pois, nestas instalações concentra toda a fonte alimentadora de uma empresa, ou de até uma grande metrópole. Logo, se vê necessário o acompanhamento em tempo real de cada ramificação, além da realização de manobras remotas nos disjuntores e demais equipamentos presentes na subestação. Dessa forma, é possível controlar o fluxo de energia elétrica de forma remota e garantir o abastecimento dos consumidores (BERGER; INIEWSKI, 2012). Na Figura 2.7 é possível observar o fluxograma de um sistema SCADA/SGE aplicado em uma subestação de energia. A exemplo deste trabalho, o sistema utiliza redes locais (LAN) e a comunicação *Modbus* para os dispositivos em nível de base.

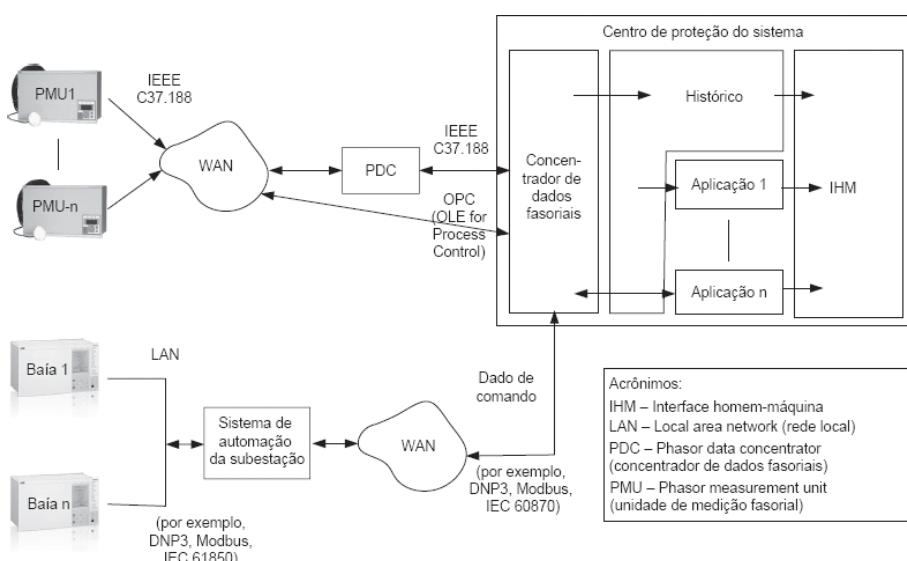


Figura 2.7 – Exemplo de um supervisório/SGE aplicado na gestão de energia elétrica em uma subestação.. Fonte: Berger e Iniewski (2012).

Os supervisórios desenvolvidos através desta metodologia possuem como sua base a comunicação entre os dispositivos, a qual pode ser realizada através de duas formas, *polling* ou interrupções. Na comunicação por consulta, o dispositivo Mestre é responsável por realizar a solicitação, ou então comando, ao dispositivo escravo. Sequencialmente, o mestre aguarda a resposta do escravo no barramento. O mestre possui o controle absoluto da rede (LUGLI; SANTOS, 2012).

Na Figura 2.8 é possível observar de forma esquematizada a operação utilizando a comunicação por consulta.

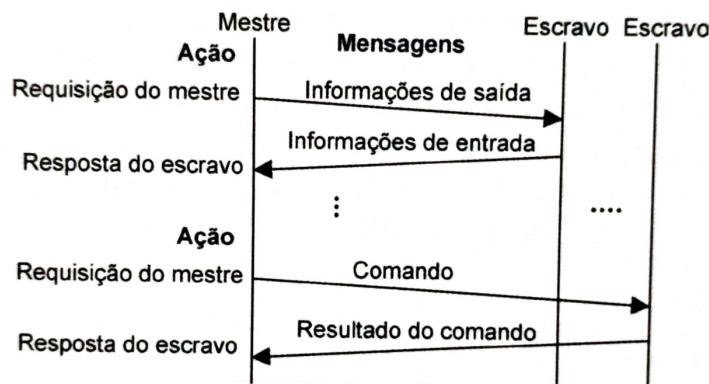


Figura 2.8 – Ciclo de operação por *polling*. Fonte: Lugli e Santos (2012)

Este modelo garante simplicidade e confiabilidade ao sistema, por exemplo, é mais simples de determinar os tempos de respostas e detectar falhas de comunicação através da checagem de um *bit* de paridade. Porém, sofre impactos na duração dos ciclos conforme o número de dispositivos na rede expande (MORAES; CASTRUCCI, 2010).

Em contrapartida, existe a comunicação por interrupção. Neste modelo a comunicação acontece por uma ação do escravo, o qual escreve no barramento quando recebe algum estímulo externo, como um sinal emitido por um sensor. Essa tipologia apesar de apresentar tempo de resposta mais curto é sujeita a colisões e não é aplicado em grandes projetos industriais (MORAES; CASTRUCCI, 2010).

2.2.6 Redes Industriais de Comunicação

Com o objetivo de automatizar uma planta industrial é necessário investir na aquisição de controladores, como CLPs e equipamentos inteligentes, como o emprego de CNCs.

Porém, para que aconteça a automatização de um processo, além do emprego de equipamentos específicos, também é preciso que aconteça a troca de informações de forma eficiente entre eles. Logo, uma rede industrial pode ser definida como uma série de protocolos de comunicação empregados para gerenciar e supervisionar ativos e a produção em uma indústria (FILHO, G. F., 2014)

Na Figura 2.9 está esboçado uma situação onde um CLP responsável por controlar determinado processo realiza a troca de informações diretamente com atuadores e sensores através de um barramento RS485, como também, recebe informações por meio de um computador utilizando o protocolo RS232. Todos estes são protocolos clássicos aplicados para a comunicação em geral (LAMB, 2015).

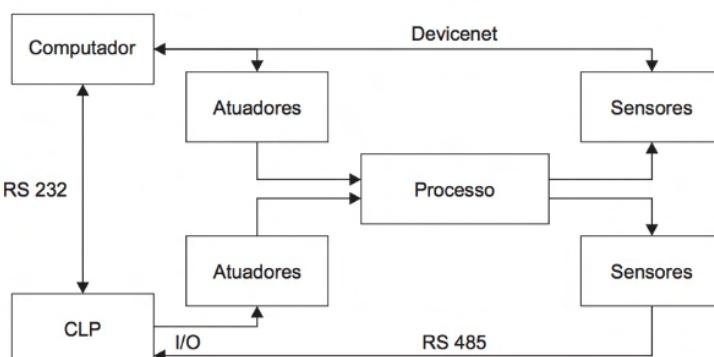


Figura 2.9 – Exemplo de uma rede industrial com comunicação RS485. Fonte: G. F. Filho (2014)

As redes industriais podem ser classificadas através do tipo de informação transportada. Redes que transportam dados discretos apenas, como condições de ON/OFF de equipamentos, são denominadas *Sensorbus* ou *Devicebus*. Sendo a primeira para dados no formato de *bits* e a segunda é aplicada para dados em formato de *bytes*. No entanto, a aplicação mais prática para as redes industriais envolve a transmissão de dados em formato de pacotes, onde é possível enviar uma mensagem, nesse caso a estrutura é denominada *Fieldbus* (LUGLI, 2010).

Com o avanço da tecnologia da informação, também foi inserida a comunicação TCP/IP nos protocolos de comunicação já existentes, aplicadas geralmente através da utilização de cabos Ethernet (LAMB, 2015). Assim, gerando novos modelos e possibilidades para serem aplicados. Atualmente, cada fabricante despende de uma solução específica baseada em um destes modelos (LUGLI, 2011).

2.2.6.1 Fragmentação das Redes Industriais

Uma Rede industrial de Comunicação pode ser fragmentadas em três níveis principais: Nível de campo, Nível de controle e Nível de fábrica.

Nível de campo

Primeiramente, é apresentado o nível de campo onde estão os maquinários em um indústria. O campo se trata efetivamente das áreas produtivas e onde estão presentes os sensores e atuadores que formam toda a instrumentação e geram a automação da planta industrial. É dentro deste nível que está presente o barramento de sensores (*sensorbus*), citado ao início desta seção. As informações transmitidas neste barramento são leituras de dados dos sensores, comandos simples para os atuadores, diagnósticos dos elementos que formam a planta industrial, dentre outros (FILHO, G. F., 2014).

Nível de controle

O segundo nível é responsável por controlar o fluxo de dados proveniente da rede *Sensorbus*. Este nível pode fornecer ao operador no chão de fábrica a possibilidade de executar funções como partida de um motor, interromper uma esteira, e outras atividades inerentes ao trabalho em campo. Esse nível reporta ao nível superior, denominado Nível de Fábrica. (FILHO, G. F., 2014). Neste caso as informações já são transportadas em pacotes de dados maiores, sendo o caso da rede *DeviceBus*

Nível de fábrica

O último grande nível no qual pode ser subdivido uma rede industrial de comunicação é o nível de fábrica. É neste nível que estão presentes os supervisórios, interfaces que apresentam aos gestores todas as informações para acompanhar a situação da planta industrial em tempo real. Neste caso, o volume de informações é processado e recebe o tratamento adequado para ser exposto ao responsável (FILHO, G. F., 2014). Nesse nível, podem ser utilizados diversos *softwares* para gerar a interface, como por exemplo, a programação em *Visual Basic* e *C#*, como no caso do presente trabalho.

Na Figura 2.10 está ilustrado a organização entre estes três níveis.

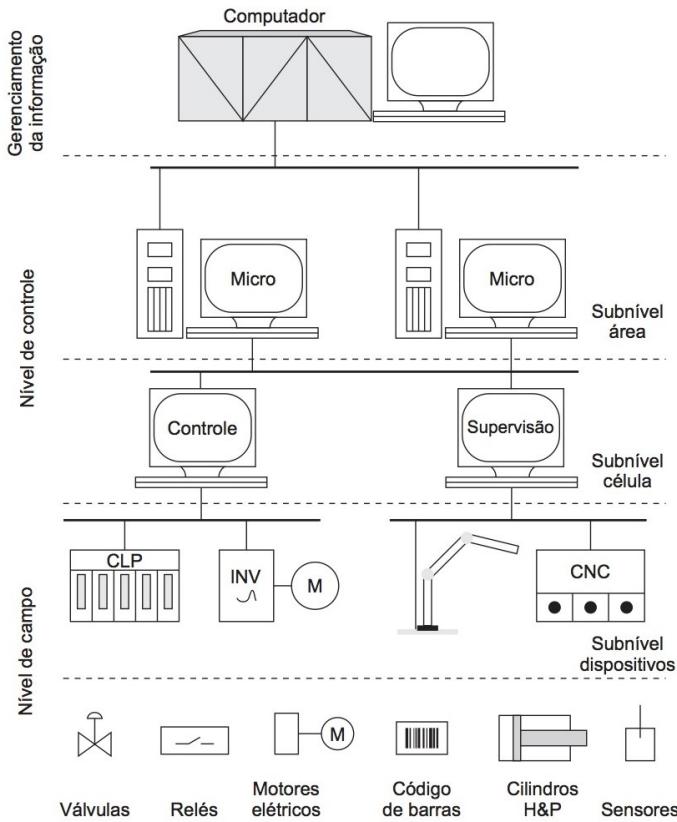


Figura 2.10 – Organograma de um sistema de automação industrial. Fonte: G. F. Filho (2014)

2.2.6.2 Topologia de redes

A maneira na qual os componentes de uma rede estão ligados entre si, os equipamentos empregados e a forma como os dados irão transitar dentro da rede definem uma topologia. A forma mais básica de realizar a ligação entre dispositivos é a associação ponto a ponto. Nesse esquema, cada dispositivo é conectado entre si e a comunicação pode ser realizada apenas par a par, e por isso, não possui grandes utilidades para o meio industrial (FOUROZAN, 2007).

Já para fins industriais, são consideradas três formas de ligação: Anel, Estrela e Barramento. Primeiramente, na ligação em anel os dispositivos estão conectados ponto a ponto de forma a criar um circuito fechado. Quando uma mensagem é enviada, ela circula pelos demais dispositivos até alcançar o receptor ou retornar para o emissor. Desse modo, uma mesma mensagem pode ser entregue a todos os equipamentos com facilidade. Porém, esse sistema é mais suscetível a falhas e uma interrupção em um dos equipamentos ou repetidores pode ocasionar na inatividade de toda a rede (FOUROZAN, 2007). É possível

visualizar o esquema de conexão em anel na Figura 2.11.

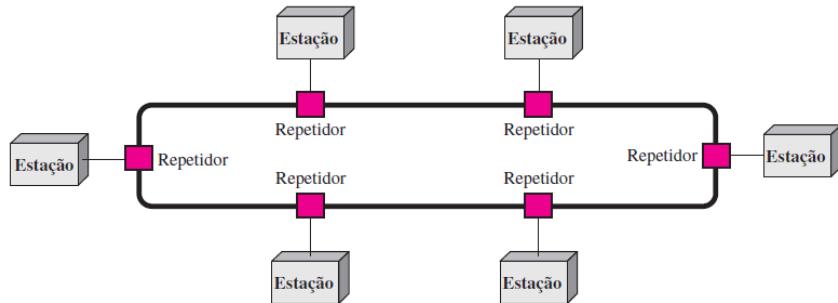


Figura 2.11 – Ligação em anel. Fonte: Fourozan (2007)

Outra junção comum nas indústrias é em estrela. Na topologia em estrela cada estação está conectada ponto a ponto ao controlador central. Esse modelo possui maior robustez do que a ligação em Anel e caso aconteça uma falha é possível isolar o local sem que haja o desligamento da rede. Contudo, os custos de construção representam um custo significativo além de existir a dependência do dispositivo central (FOUROZAN, 2007). Na Figura 2.12 é apresentado a topologia em estrela.

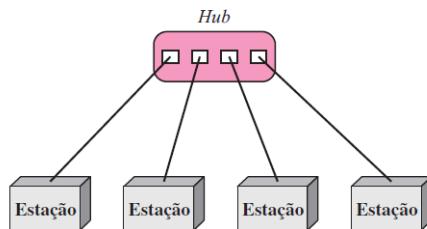


Figura 2.12 – Ligação em estrela. Fonte: Fourozan (2007)

Por fim, é apresentada a topologia de Barramento. Esse modelo contrasta com os demais, pois apresenta uma conexão multiponto, enquanto os outros modelos já citados são ponto a ponto. O modelo em barramento se caracteriza por possuir um longo cabo atuando como *backbone* interligando todos os instrumentos conectados à rede. Esse sistema possui fácil instalação e ampliação, mas o sinal pode sofrer interferências devido às outras conexões realizadas no barramento, resultando em uma limitação de dispositivos que podem ser conectados (FOUROZAN, 2007). A imagem a seguir apresenta uma simplificação da topologia de barramento.

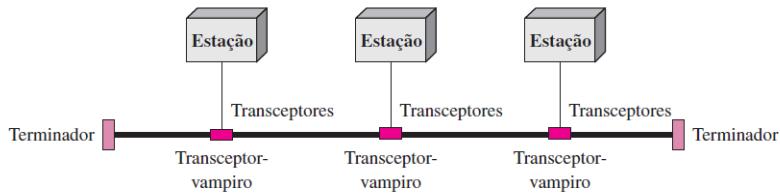


Figura 2.13 – Ligação em barramento. Fonte: Fourozan (2007)

2.2.6.3 Protocolo Modbus

O padrão *Modbus* é um protocolo de comunicação criado na década de 70 pela Modicon Inc. e, atualmente, pertencente ao grupo Schneider Electric (BORGES, 2007).

O *Modbus* se trata de um protocolo aberto do tipo *Devicebus* aplicado principalmente para a comunicação em série e com grande utilização para o monitoramento de variáveis em campo (BORGES, 2007). Existem duas formas de transitar os dados nesse padrão:

- **MODBUS RTU:** Caracteres codificados em 8 bits + 1 bit de paridade;
- **MODBUS ASCII:** Caracteres codificados em 7 bits + 1 bit de paridade;

O protocolo *Modbus* pode ser enquadrado num modelo genérico de comunicação mais amplo aplicado nos mais diferentes segmentos, o qual é denominado modelo OSI. O modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) é baseado em um modelo proposto pela ISO (*Internation Standards Organization*) para a padronização de protocolos de comunicação que utilizam de várias camadas (TANENBAUM; WETHERALL, 2011). O padrão *Modbus* contempla três níveis descritos no modelo OSI, sendo eles a camada física (1), enlace de dados (2) e aplicação (7), estes níveis são compatíveis com os níveis de campo, de controle e de fábrica. O nível 1, composto pelo meio de transmissão físico pode utilizar cabos de par trançado nos padrões RS232, RS485, Anel de corrente, dentre outros. Já o enlace de dados se dá através do acesso à rede por mecanismo do tipo mestre/escravo. Nesse caso, o início da comunicação está restrito ao dispositivo mestre, enquanto os dispositivos escravos respondem a mensagem ou executam a ação solicitada. As ordens do mestre podem ser dirigidas a um escravo em específico ou então difundidas para todos os dispositivos. Por último, no nível de aplicação estão presentes as funções de leitura e escrita de variáveis (BORGES, 2007).

As mensagens enviadas pelo dispositivo central devem conter as seguintes informações:

- Endereço do escravo;
- Código da ação a ser executada;
- Eventuais dados para operações de escrita;
- Código para verificação de erro;

Já as respostas dos escravos devem apresentar os seguintes pontos:

- Confirmação da ação executada;
- Eventuais dados para operações de escrita;
- Código para verificação de erro;

A configuração da mensagem a ser enviada pode ser visualizada na Figura 2.14.

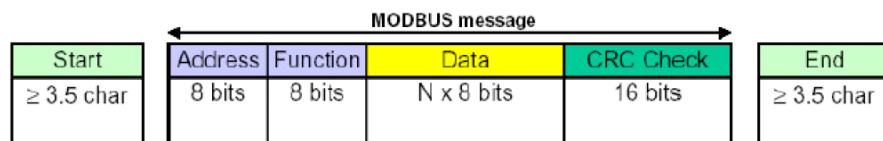


Figura 2.14 – Modelo de mensagem para padrão Modbus RTU. Fonte: (BORGES, 2007)

2.2.6.4 Meios físicos de transmissão

O barramento de transmissão de dados em campo, o *bus* propriamente dito, é constituído por uma parte de fios trançados responsável por realizar a comunicação de forma serial. Geralmente, são empregados os padrões da família RS, a qual estabelece características elétricas e digitais para que a transmissão dos dados ocorra com sucesso. A seguir está disposto uma tabela comparativa dos principais formatos presentes nessa família (KUGELSTADT, 2021).

	RS 232	RS 422	RS 485
Tipo de linha de transmissão	desbalanceado	diferencial	diferencial
Nº máx. De transmissores	1	1	32
Nº máx. De receptores	1	10	32
Comprimento máximo de cabos (m)	15,2	1200	1200
Taxa de transmissão máx.	20 kb/s	10Mb/s	10 Mb/s

Figura 2.15 – Comparativo entre os padrões RS 232, RS 422 e RS 485 . Fonte: (FILHO, G. F., 2014)

RS485

A padronização RS485 se trata de normas para a construção do meio físico de transmissão de dados, definindo as características físicas para o cabeamento utilizado e os níveis lógicos para a operação.

O padrão RS485 sugere que os dispositivos nos quais desejasse fazer a comunicação sejam conectados em rede, através de um barramento principal. O barramento pode ser projetado para transmissão *Full-Duplex* ou *Half-Duplex* (KUGELSTADT, 2021) conforme o apresentado na Figura 2.16.

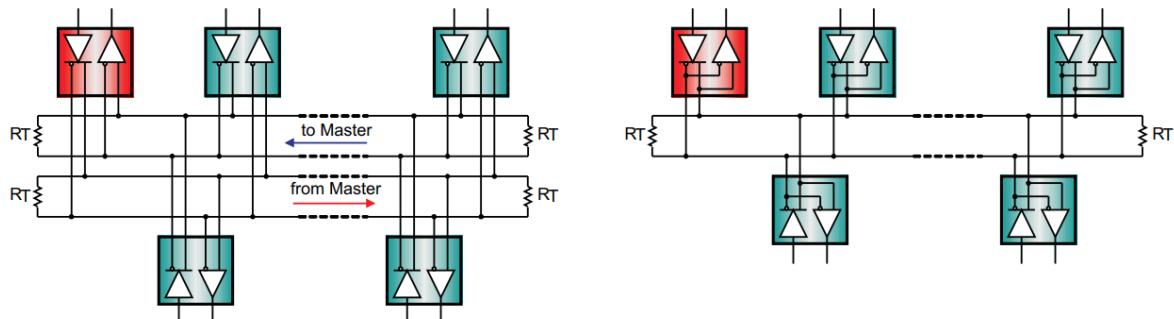


Figura 2.16 – Estruturas *Full-Duplex* e *Half-Duplex*. Fonte: (KUGELSTADT, 2021)

No caso do modelo Half-Duplex é utilizado apenas um par de cabos trançados, então o direcionamento e o recebimento de informações devem ocorrer em momentos diferentes. Já para o Full-Duplex são empregados dois pares de cabos e permite a ocorrência simultânea. Em relação aos estados lógicos dos sinais é aconselhado utilizar um diferencial de potencial de $\pm 1.5V$ ou $\pm 200mV$, conectado em uma carga de 54Ω (KUGELSTADT, 2021).

As aplicações RS485 se beneficiam da robustez gerada pelos cabos trançados, minimizando influências eletromagnéticas comuns no ambiente industrial. É indicado o emprego de cabos trançados revestidos, blindados, com impedância característica de 120Ω e diâmetro entre 22 e 24AWG (KUGELSTADT, 2021). É possível observar na Figura 2.17 a seguir um exemplo de cabo para a conexão *Full-Duplex*.

É válido salientar que as terminações devem ser fechadas através de um resistor de terminação (RT) conforme observado na Figura 2.16. Esse resistor deve garantir que a impedância característica no cabo seja de $Z_0 = 120\Omega$. Para ambientes onde exista forte interferência externa, deve ser aplicado um filtro passa-baixa.

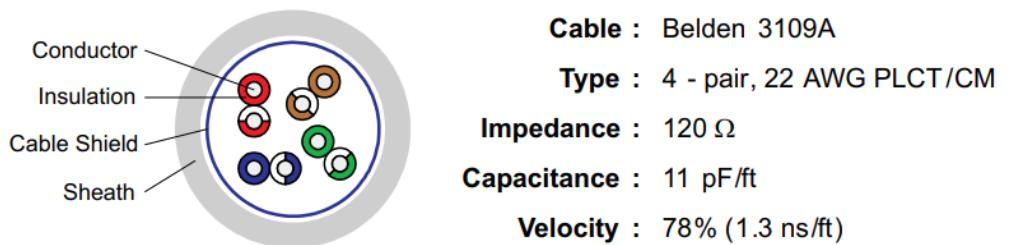


Figura 2.17 – Exemplo para cabo de comunicação RS485. Fonte: (KUGELSTADT, 2021)

2.2.7 ESP32

A partir do ATMEGA328P, e, consequentemente, da plataforma Arduino Uno, surgiram diversos outros microcontroladores disponíveis de cada vez mais atribuições, como é o caso do ESP32 da *Espressif Systems*. Essa plataforma é um microcontrolador de baixo custo que dispõe de comunicação Wi-Fi e Bluetooth integrados, tornando-se uma poderosa ferramenta para projetos que envolvam *Internet-of-Things (IoT)* (KURNIAWAN, 2019). De forma mais detalhada, o ESP32 utiliza um processador *dual-core* operando em 240MHz, 512Mb de memória SRAM, conexão Wi-Fi 802.11 b/n/g e Bluetooth 4.2. Além disso, a plataforma conta com 36 sinais de GPIO, dentre os quais estão sinais de PWM e conversores A/D (SYSTEMS, 2021). O esquemático do ESP32 é apresentado na Figura 2.18.

Um grande diferencial dos chips produzidos pela *Espressif Systems* é a possibilidade de utilizar diversos ambientes para a programação. Alguns exemplos de IDEs compatíveis são: Visual Studio, Arduino IDE, CodeBlocks, NetBeans, Lua, dentre outros. Além disso, a linguagem utilizada é baseada em C/C++, tornando-se acessível a grande maioria dos usuários (KURNIAWAN, 2019).

2.2.8 Comunicação *Wireless*

O termo *Wireless* possui origem da língua inglesa aonde *wire* significa "cabo", enquanto *less* pode ser expressado como "sem", ou seja, sem fios. A comunicação sem fios pode se dar pelos mais diferentes meios, desde através de princípios ópticos, como a utilização de infravermelhos nos aparelhos de TV, até a utilização da rede de internet por meio da irradiação de ondas eletromagnéticas.

O início da comunicação sem fio remonta ao envio de códigos Morse em 1901, porém,

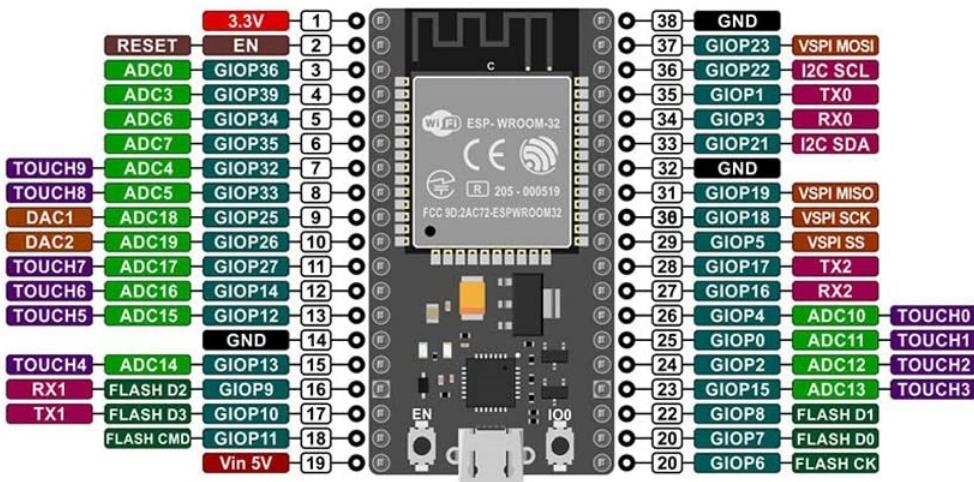


Figura 2.18 – Esquemático do ESP32. Fonte: (ZIMERMANN, 2020)

para que isso fosse possível, existiram outros marcos na história, como a descoberta da indução eletromagnética por Faraday em 1831 e a sua demonstração em público realizada por Tesla em 1893 (MENEZES, 2009).

A primeira utilização de redes sem fio de forma eficiente foi desenvolvida pela Universidade do Havaí, em 1971, conectando computadores em quatro ilhas do estado sem utilizar uma rede física. Já na década de 80 houve uma grande expansão das redes sem fio atingindo a computação pessoal. Nesse momento, existiam diversos padrões para a comunicação sem fio, de forma que a rede como um todo se encontrava desestruturada. No entanto, a IEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) apresentou em novo padrão em meados dos anos 90 denominado IEE 802.11 e em 1997 já eram aplicados para o uso em galpões logísticos (ENGST; FLEISHMAN, 2005).

O padrão IEE 802.11 foi expandido e ganhando variações como o protocolo 802.11b de 2.4 GHz de 1999, com velocidade para a transmissão de dados de até 11Mbps (ENGST; FLEISHMAN, 2005). Atualmente, o protocolo na maioria dos dispositivos que se comunicam através de Redes LAN (*Local Area Network*), como é o caso do módulo ESP32 citado na sessão anterior. Além disso, esse padrão é comumente conhecido pela sigla Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) (BRANQUINHO; REGGIANI; ANDREOLLO, 2005).

2.2.9 Visual Studio

O Microsoft Visual Studio é um ambiente de programação desenvolvido e fornecido pela Microsoft. Este *software* é classificado como um Ambiente de Desenvolvimento integrado (IDE), e oferece suporte a variadas linguagens de programação tais como: Visual Basic, C, C++, C#, Python, dentre outras. Através dos pacotes .NET, o Visual Studio permite o desenvolvimento de aplicações para dispositivos móveis, *desktops* e aplicativos para Web (MICROSOFT, 2022).

2.2.9.1 .NET Framework

O pacote .NET Framework é uma infraestrutura para a elaboração de aplicativos na plataforma Windows através da IDE do Visual Studio. O .NET Framework, junto ao Visual Studio .NET e ao próprio sistema operacional Windows compõe a plataforma .NET, sendo esta uma estratégia da Microsoft para facilitar o desenvolvimento de aplicações e dispositivos para os seus produtos (THAI; LAM, 2002).

Uma das grandes vantagens desta plataforma integrada é a possibilidade de desenvolver soluções em qualquer linguagem, desde que os componentes atendam as regras necessárias. Em um organograma da plataforma Windows, Figura 2.19, é observado que o pacote .NET Framework compõe o alto-nível de programação

Na Figura 2.19 nota-se a presença de três classes logo abaixo, sendo elas, Web Services, Web Forms e Windows Forms.

O Windows Forms oferecem um modelo de programação unificado para o desenvolvimento de aplicativos no sistema operacional Windows. O Windows Forms atua como uma API nativa do sistema operacional, porém, muito mais poderoso em funções e classes, de forma que seja possível gerar uma interface gráfica para o usuário (THAI; LAM, 2002).

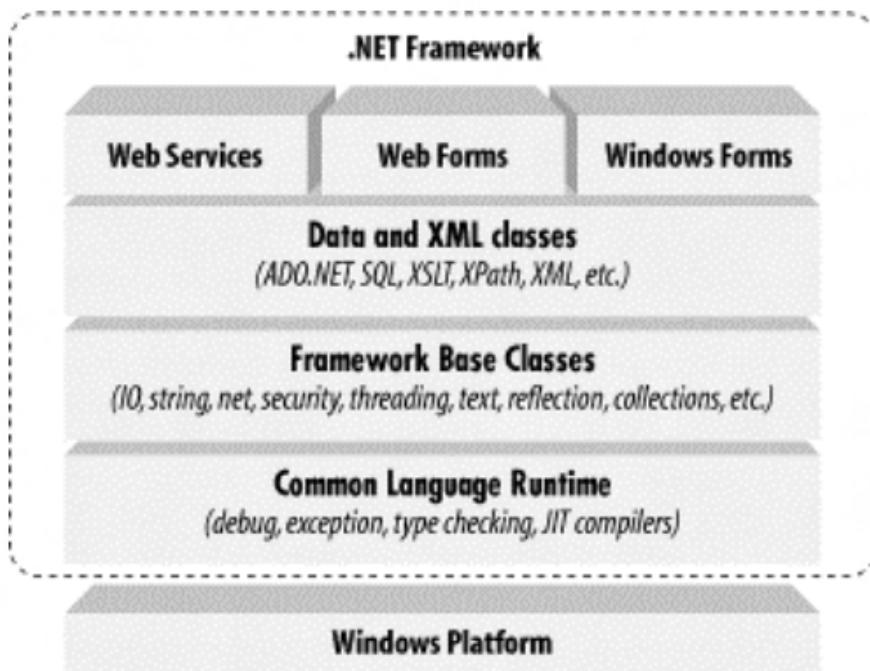


Figura 2.19 – Organograma da plataforma .NET. Fonte:(THAI; LAM, 2002)

Capítulo 3

Desenvolvimento

Este capítulo possui como propósito apresentar as etapas de elaboração deste trabalho de conclusão de curso. No primeiro momento, serão descritos os principais métodos e materiais utilizados para o desenvolvimento desse projeto, assim como os softwares aplicados. Após isso, são descritas as etapas de execução do projeto, onde estão definidos os parâmetros e os procedimentos adotados.

Com o propósito de atingir o objetivo final, inicialmente, foi construído o fluxograma do projeto, direcionando o foco para os dispositivos empregados em cada etapa. O esquemático está presente na Figura 3.1.

3.1 Funcionalidades

O primeiro passo para o desenvolvimento do projeto é a definição das funções desejadas ao sistema projetado. Tais funcionalidades devem estar alinhadas às expectativas apresentadas nas Seções 1.1 e 1.2 deste documento. Então, é imprescindível que o sistema projetado possua as seguintes características:

- Possuir como característica ser de fácil instalação, em caso de uma aplicação real;
- Realizar a leitura do consumo de energia em tempo hábil, considerando a taxa de amostragem;
- Gerar dados para estimar o perfil de consumo de cada equipamento ou setor;

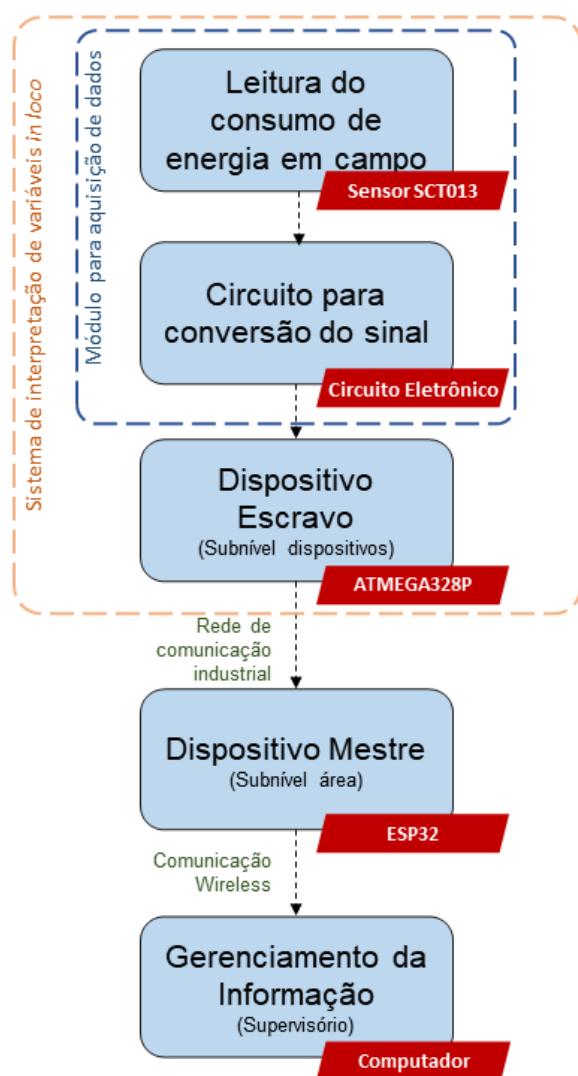


Figura 3.1 – Fluxograma do projeto. Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Módulo de aquisição de dados

Com o intuito de realizar a aquisição dos dados referentes a consumo elétrico na planta industrial, foi aplicado o sensor de corrente SCT013-000 conforme o Tópico 2.2.2. O sensor será conectado a um microcontrolador ATMEGA328P apresentado na Figura 2.4.

Conversor Corrente-Tensão

Devido ao fato do sensor SCT013 se tratar basicamente de um transformador de corrente, o sinal emitido é a senoide espelhada da corrente drenada pelo equipamento no

qual se deseja realizar a medição. No entanto, o dispositivo não é capaz de realizar a leitura da corrente diretamente, logo, é necessário aplicar os conceitos básicos de teoria de circuitos elétricos com o intuito de transformar uma fonte de corrente em um diferencial de potencial.

Para a transformação da corrente de sinal fornecida pelo sensor em um sinal de tensão será calculada a Resistência de Carga (RL) conforme as especificações técnicas do sensor.

Através da Tabela 2.1, o sensor SCT013 possui a capacidade de aferir correntes de até $100A_{rms}$, ou seja, com valor máximo da senoide em $141,4A$. O mesmo se aplica ao circuito secundário, onde a forma de onda é espelhada. Então:

$$I_{2Pico} = \frac{I_{1Pico}}{N} = \frac{I_{1rms} \cdot \sqrt{2}}{N} \quad (3.1)$$

Onde:

- I_{1Pico} : Corrente de pico no enrolamento primário;
- I_{2Pico} : Corrente de pico no enrolamento secundário;
- I_{1rms} : Corrente RMS no enrolamento primário;
- N : Relação de transformação;

É importante lembrar que N é a relação de transformação do circuito primário, formado pelo sensor SCT013, com um total de 2000 espiras e o circuito secundário, que usualmente é tratado com apenas uma espira. Logo, isto resulta em um quantitativo igual a $N = \frac{2000}{1} = 2000$.

As entradas analógicas dos pinos do controlador oferecem suporte para tensões de $0V$ até $5V$. Logo, o valor de tensão entre o pico negativo e o pico positivo deve estar incluso nessa faixa. Desse modo, é preciso aplicar um *offset* de $2,5V$, deslocando toda a senoide gerada para o intervalo de leitura do microcontrolador. Nesse caso, a Resistência de Carga (RL) será dada por:

$$R_L = \frac{5V/2}{I_{2Pico}} = 35,4\Omega \quad (3.2)$$

A Equação 3.2 indica que deve ser empregado um resistor de $35,4\Omega$, no entanto, não existe um modelo comercial padrão desse componente que corresponde a essa característica. Portanto, será utilizado um resistor de 33Ω para realizar os testes. Como o circuito

secundário do sensor de corrente SCT013 pode fornecer até $50mA$ de corrente de pico, a potência máxima necessária para o resistor dissipar será dada por:

$$P_{rms} = \frac{5V}{\sqrt{2}} * \frac{0,100}{\sqrt{2}} = 0,25W \quad (3.3)$$

Ou seja, deve ser aplicado um resistor de 33Ω com capacidade de dissipar $1/4W$.

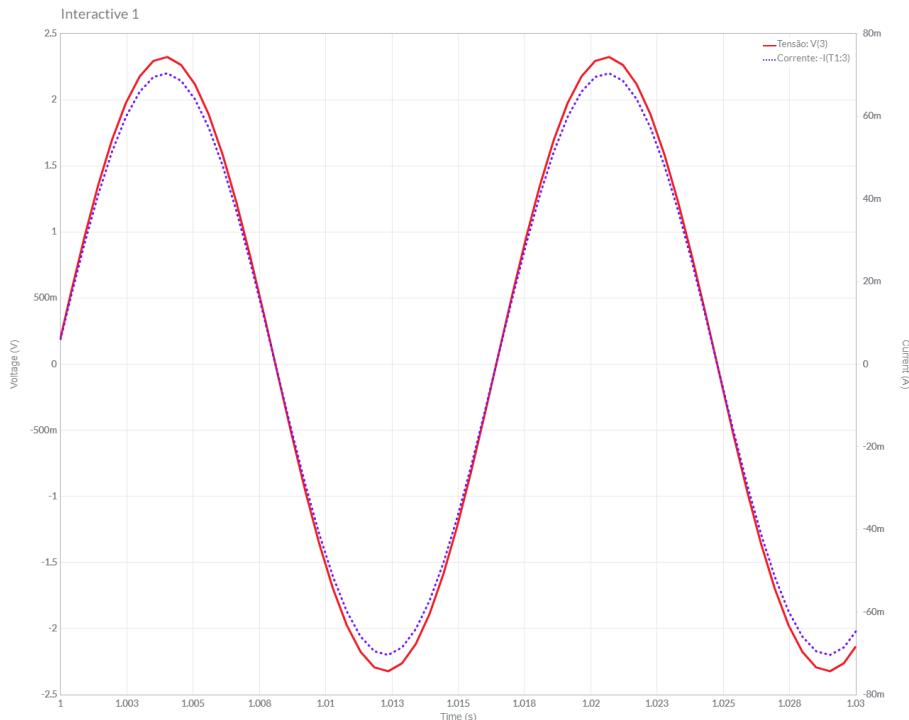


Figura 3.2 – Sinal gerado no circuito secundário. Fonte: elaborado pelo autor.

Nesse momento, foi solucionado o problema da conversão da corrente para a tensão, possibilitando a leitura do sinal pelo microcontrolador. Entretanto, existe outra limitação a ser pontuada, a forma de onda exibe uma faixa de valores entre $-2,33V$ a $+2,33V$, mas as entradas analógicas só são capazes de realizar a leitura de valores entre $0V$ e $5V$. Uma solução é sobrepor um sinal contínuo de $2,5V$ sobre a forma de onda original, o que resultaria em um *offset*, deslocando a senoide para o intervalo desejado. Para que isso ocorra, foi construído um circuito divisor de tensão. O circuito de conversão de corrente para tensão já foi projetado para se adequar a escala de valores do microcontrolador.

Circuito Divisor de Tensão

O passo primordial para desenvolver um circuito divisor de tensão consiste na escolha das resistências a serem aplicadas. Esse circuito é constituído de uma fonte de alimentação seguido por duas resistências conectadas em série, como apresentado na Figura 3.3

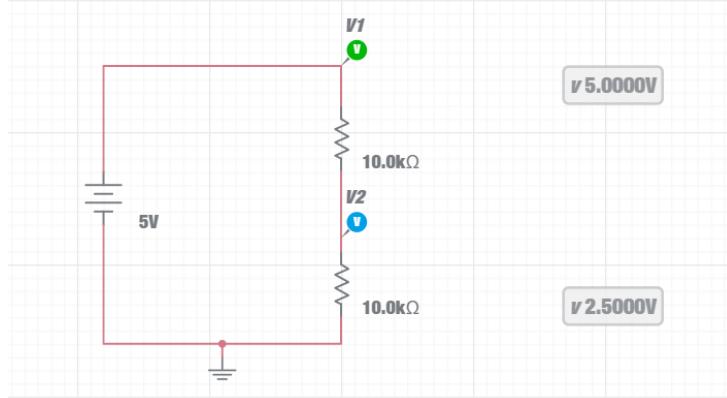


Figura 3.3 – Representação de um circuito divisor de tensão. Fonte: elaborado pelo autor.

Através da aplicação das Leis de Kirchhoff na malha de circuito apresentada na Figura 3.3 (NILSSON; RIEDEL, 2016), é alcançadas as seguintes equações.

$$v_s = iR_1 + iR_2 \quad (3.4)$$

$$i = \frac{v_s}{R_1 + R_2} \quad (3.5)$$

Agora, utilizando a Lei de Ohm, é possível calcular as tensões sobre os resistores R_1 e R_2 :

$$V_1 = iR_1 = v_s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.6)$$

$$V_2 = iR_2 = v_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.7)$$

Como o propósito do divisor de tensão para esse projeto é aplicar um sinal contínuo de 2,5V sobre o sinal original proveniente do sensor de corrente, e a fonte de tensão v_s possui 5V originários do microcontrolador, é fácil perceber que V_1 e V_2 serão iguais, considerando neste caso o resistor ideal. Logo, reescrevendo 3.6 e 3.7:

$$v_1 = v_2 \Rightarrow v_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = v_s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_1 = R_2 \quad (3.8)$$

Então, o uso de resistores idênticos é o suficiente, para essa aplicação. Assim, foram utilizados resistores de $10\text{k}\Omega$. Uma solução mais elegante é aplicar um trimpot em subs-

tituição a um dos resistores, de forma que seja possível ajustar com precisão para que o divisor de tensão seja exato.

Seguindo adiante, para definir a potência dissipada pelos resistores é verificado o seguinte cálculo:

$$I_{div} = \frac{V_{div}}{R_{eq}} = \frac{5V}{20k\Omega} = 0,25mA \quad (3.9)$$

$$P_{div} = V_{div} * I_{div} = 5 * 0,25mA = 0,125W \quad (3.10)$$

Portanto, serão aplicados resistores de $10k\Omega$ e potência dissipada de $1/8W$.

Para complementar um circuito divisor de tensão é necessário adicionar um Capacitor de Desvio ou Capacitor de Desacoplamento, pois é um artifício que atua na remoção de ruídos AC em um sinal contínuo. Segundo Amorim (2019) o dimensionamento do capacitor de desacoplamento é dado pela seguinte equação:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot 0,1 \cdot (R_1 \parallel R_2)} \quad (3.11)$$

Onde:

- **C :** Capacitância do componente;
- f_s : Frequência da corrente alternada sobre o capacitor;
- **0,1:** Relação entre o capacitor e frequência de quina;
- $R_1 \parallel R_2$: Resistência equivalente percebida pelo capacitor.

Através da aplicação da Equação 3.11, é obtido uma capacitância de $5,31\mu F$, porém, devido a fins de disponibilidade será utilizado um capacitor de $10\mu F$.

Com isso, o circuito projetado é apresentado na Figura 3.4.

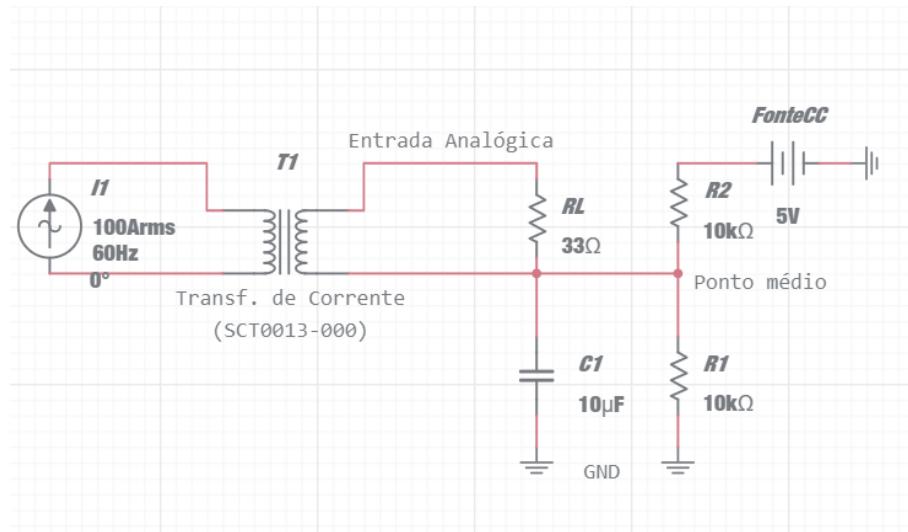


Figura 3.4 – Esquemático do circuito projetado. Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.2 Dispositivo escravo

O dispositivo escravo, no caso deste trabalho, pode ser descrito como o circuito responsável por realizar a leitura dos dados provenientes dos sensores e escrever no barramento da rede de comunicação industrial. Logo, podendo ser nomeado como o Conversor Analógico/Digital quando é analisada a sua função. O circuito apresentado na Figura 3.4 é capaz de transformar o sinal de corrente do sensor SCT013 em um sinal de tensão em níveis adequados para o microcontrolador. Porém, ainda assim é necessário enviar os dados coletados em longas distâncias, então, tornando-se necessária a digitalização.

Antes, é necessário apresentar dois parâmetros importantes para a escolha dos componentes. A interface A/D é montada em campo, formando um único módulo com o sensor SCT013 e o circuito eletrônico. Este dispositivo possui a função de atuar com o processamento dos sinais provenientes do sensor, além de ser o dispositivo escravo comunicando com a rede industrial de comunicação.

Somando estas características com a necessidade do dispositivo apresentar um tamanho reduzido, simplicidade de programação e fácil aquisição, foi definido a utilização de um microcontrolador Arduino Nano. Essa placa contém 08 entradas analógicas (ATMEL, 2008), logo, será possível realizar a medição de múltiplos equipamentos que estiverem próximos. Soares (2021) abordou técnicas para a identificação de cargas através um mesmo dispositivo para a mensuração, métodos os quais podem ser aplicados posteriormente visando a utilização de uma quantidade reduzida de pontos de medição.

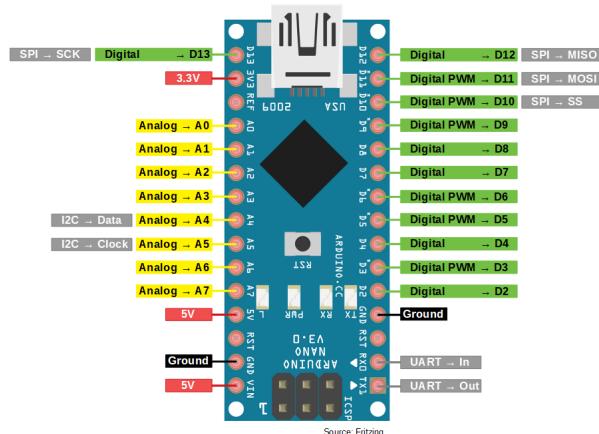


Figura 3.5 – Esquemático da plataforma Arduino Nano. Fonte: (DIYIOT, 2021)

3.2.3 Rede de Comunicação industrial

A rede de comunicação industrial é responsável por realizar a transição de dados entre os dispositivos que estão alocados em campo (escravos) com um dispositivo central (mestre). Para que a comunicação seja eficiente, foram elaborados diversos protocolos ao longo da evolução das tecnologias de telecomunicações. Dessa forma, nessa etapa foi desenvolvido um protocolo de comunicação que segue os moldes do protocolo *Modbus* e opera no meio físico com as características elétricas do padrão RS485. .

A escolha por esses protocolos ocorreu pela capacidade de utilizar múltiplos dispositivos conectados entre si através de um barramento, como explicitado na Figura 2.15. Esse padrão foi aplicado em conjunto ao padrão de camada física RS485, utilizando a topologia apresentada na Figura 2.13. De forma simplificada, é possível considerar que em cada estação estará presente uma unidade de medição, na qual um microcontrolador realiza a escrita na rede quando solicitado pelo aparelho mestre que se encontra plugado ao mesmo barramento, seguindo o que foi apresentado na Figura 2.8.

Quando o protocolo ModBus é aplicado junto ao padrão físico RS485, é possível realizar a conexão de até 32 dispositivos a rede, logo então, se enquadrando para a realização de um sistema de telemetria multiponto, essa etapa é definida como nível físico. Partindo para os procedimentos de comunicação, apenas um dispositivo possui a iniciativa de realizar o envio das mensagens, estando os outros restritos a resposta ou então a execução de uma ação. Assim existe a centralização dos dados conforme o especificado nas atribuições desse projeto.

3.2.3.1 Meio físico

O padrão RS485 define as características físicas e elétricas para que a comunicação ocorra num barramento. Para atingir esses parâmetros foi empregado um módulo MAX485, seguindo as recomendações citadas por Kugelstadt (2021). Para o protótipo, o barramento será formado através de uma placa de ensaios, para possibilitar a adição e remoção de dispositivos da rede industrial com agilidade.

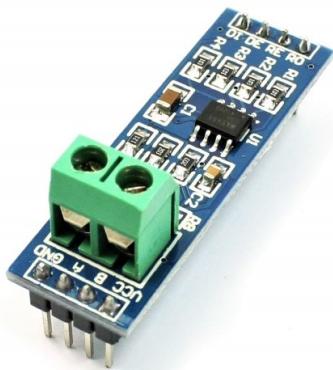


Figura 3.6 – Módulo Conversor RS485 para Arduino. Fonte: (FILIPEFLOP, 2021)

3.2.4 Dispositivo Mestre

O dispositivo centralizador de dados, também denominado dispositivo mestre, possui dois propósitos: realizar a leitura do consumo de energia em toda a rede de sensores e enviar os pacotes de dados através da comunicação sem fio. Dessa forma, foi empregado o uso do módulo ESP32, o qual dispõe de conexão Wi-Fi 802.11 b/g/n, seguindo o padrão IEE.

O módulo *Wi-fi* presente no chip do ESP2 consegue atingir uma potência de transmissão de até +20,5dB, quando utilizado o padrão 802.11 b (SYSTEMS, 2021).

3.2.5 Supervisório

Como em um sistema SCADA/SGE, a interface para o usuário atua como um supervisório fornecendo uma visão local e também geral do perfil de consumo energético da planta industrial. A interface foi desenvolvida através da IDE Visual Studio e do Win-

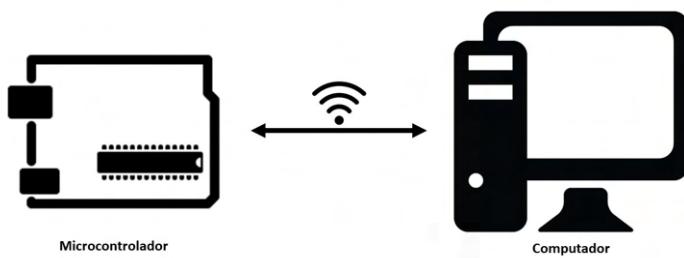


Figura 3.7 – Comunicação *wireless*. Fonte: Elaborado pelo autor

dows Forms, com programação em C#. Algumas das informações apresentadas por essa interface são:

- Apresentar os dados de consumo geral de toda a rede de sensores;
- Informar o consumo de energia para setores/sensores de forma individual;
- Apresentar características como a potência instantânea drenada na planta industrial, tensão disponível nas fontes alimentadoras, etc ;
- Conter o histórico de consumo para consultas posteriores;

3.2.6 Softwares

Para o desenvolvimento do trabalho foi necessário a utilização de alguns *softwares*. Sendo eles:

Arduino IDE

O ambiente de programação oferecido pela *Arduino CC*. é utilizado tanto para a programação dos próprios chips oferecidos pela empresa, quanto para o chip ESP32 da *Espressif Systems*. Esse *software* é gratuito e *opensource*, e, além disso, a linguagem de programação é o C/C++.

Multisim Live

O Multsim Live é um simulador para circuitos eletrônicos online e gratuito fornecido pela *National Instruments*. O software é leve e de fácil operação, tornando-se ideal para a simulação de circuitos elétricos e eletrônicos de forma ágil.

Visual Studio 2019 Community

O Visual Studio é um ambiente de desenvolvimento integrado para a programação de soluções em diversas linguagens de programação. O software é gratuito e disponibilizado

para *download* no site da própria Microsoft. Junto ao Visual Studio também foi feito o uso da classe .NET Framework 4.8. É válido lembrar que as funções necessárias para o desenvolvimento deste trabalho estão disponíveis apenas nessas versões citadas.

Autodesk Tinkercad

O Tinkercad é um aplicativo para a *web* gratuito e com grande acessibilidade. No Tinkercad é possível construir circuitos eletrônicos e simular suas ações. Além disso, o software disponibiliza funções para gerar elementos 3D.

3.3 Protótipo

Nesta etapa estão expostos os passos para o desenvolvimento do protótipo. O protótipo retrata de forma simplificada um sistema de telemetria multiponto não invasivo com o propósito de ser aplicado para a supervisão do perfil de consumo energético em uma planta industrial. Para a construção do protótipo foi definida a utilização de dois dispositivos escravos conectados a um dispositivo mestre através de um barramento. Essa escolha se deu em razão da disponibilidade de recursos do autor deste trabalho. Mais detalhes sobre as escolhas realizadas e o funcionamento do sistema estão dispostos nas subseções a seguir.

Na Figura 3.8 é exposto o protótipo elaborado para este trabalho. Todas as suas características e nuances serão discriminadas ao longo dessa seção.

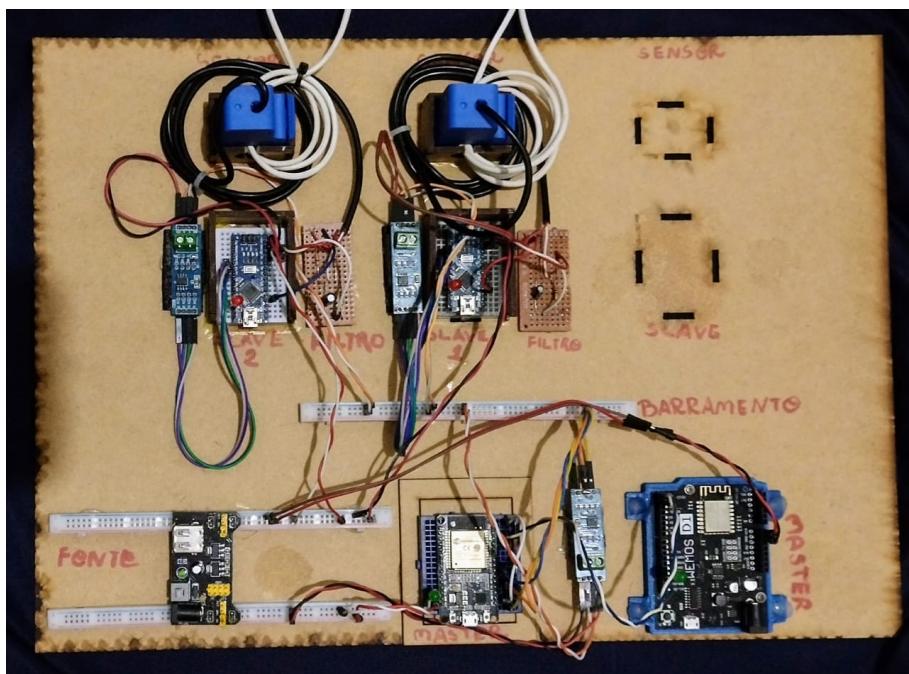


Figura 3.8 – Protótipo elaborado para validação do sistema aqui projetado. Fonte: Acervo pessoal do autor.

3.3.1 Módulo de aquisição de dados

A construção do protótipo se inicia pela instrumentação da planta industrial. O sensor SCT013 em conjunto com o circuito de adequação do sinal formam o módulo de aquisição de dados. Logo, seguindo o passo apresentado na Seção 3.2.1 foram construídos dois circuitos eletrônicos conforme o esquemático presente na Figura 3.9.

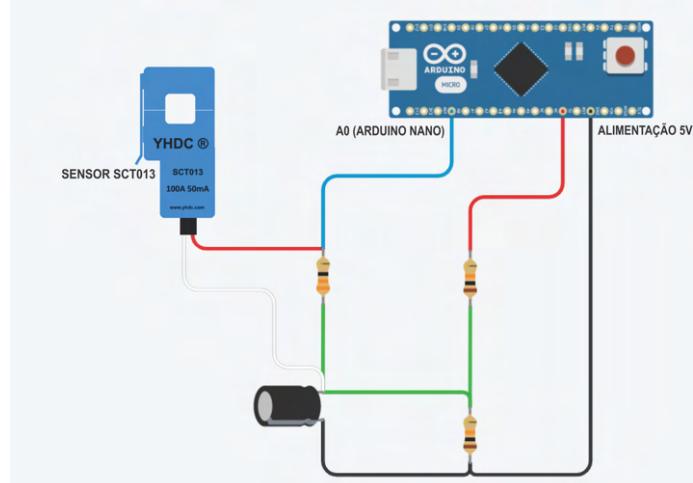


Figura 3.9 – Módulo de aquisição de dados. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o esquemático elaborado, foi utilizada uma placa de fenolite perfurada para a construção do circuito. Foi optado pela placa perfurada pois é necessário possuir flexibilidade no momento de elaboração do protótipo. É possível observar as placas construídas na Figura 3.10

Após a construção das placas, foram elaborados testes com o intuito de verificar o funcionamento do módulo de aquisição de dados e aferir a calibração do sensor a partir de ensaios em laboratório. Para a leitura e conversão do sinal foi construído um código em C++ no ambiente de programação do Arduino. Também foi empregada as funções da biblioteca EmonLib desenvolvida pela *Open Energy Monitor*.

Para a leitura da corrente são utilizadas as funções EnerMonitor.calcIrms() e para o cálculo da potência basta realizar a multiplicação pela tensão da rede. É válido lembrar que esse dispositivo é aplicável para a mensuração de consumo de energia apenas em equipamentos robustos, que demanda de grandes correntes elétricas, possuindo baixa ou nenhuma sensibilidade para variações sutis, isso se deve ao range do sensor de corrente utilizado que mesura até 100_A . Na etapa seguir, estará descrito passo a passo o processo de aferição do circuito.

3.3.1.1 Calibração do sensor

Teixeira (2017) menciona em seu trabalho que a medição é a base do processo de experimentação. Logo, é essencial que além do sistema operar em sintonia, também apresentar dados confiáveis e que refletem a realidade.

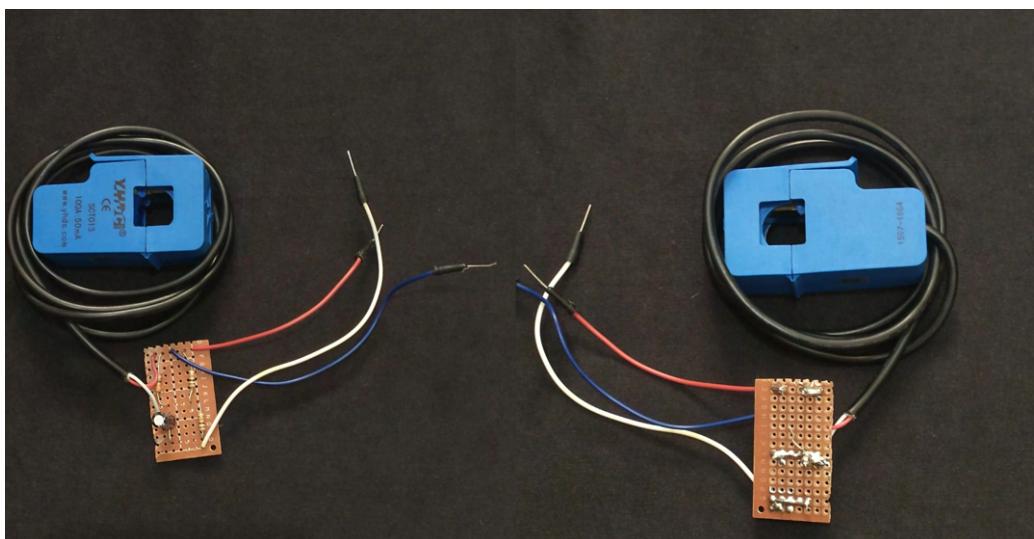


Figura 3.10 – Placas construídas para o circuito de aquisição de dados. Fonte: Acervo pessoal do autor.

A calibração é um processo que consiste basicamente em uma comparação entre os valores mensurados pelo instrumento e valores padrões já definidos previamente. Consequentemente, é necessário que exista um padrão, podendo ser originário de um conjunto de valores estabelecidos por agências normativas ou por instrumentos ajustados para atuar de acordo com estas normas.

Com base nesta comparação, é possível prever os erros sistemáticos do sistema e sua correspondência com a grandeza sendo medida. O resultado da calibração permite tanto o estabelecimento dos valores mensurados para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas.

Com o intuito de garantir um funcionamento eficaz do instrumento desenvolvido, foi utilizado como modelo padrão os dispositivos presentes no Laboratório de Máquinas Elétricas do CEFET-MG Campus V. Foi realizada uma montagem conforme pode ser visualizado na Figura 3.11. A montagem dispõe dos seguintes itens:

- Sensor SCT013;
- Circuito de adequação do sinal;
- Resistor de potência Eletele de 100Ω e $500W$;
- Multímetro digital de precisão POL-19;
- Arduino Uno R3;

- Computador para a leitura dos dados;

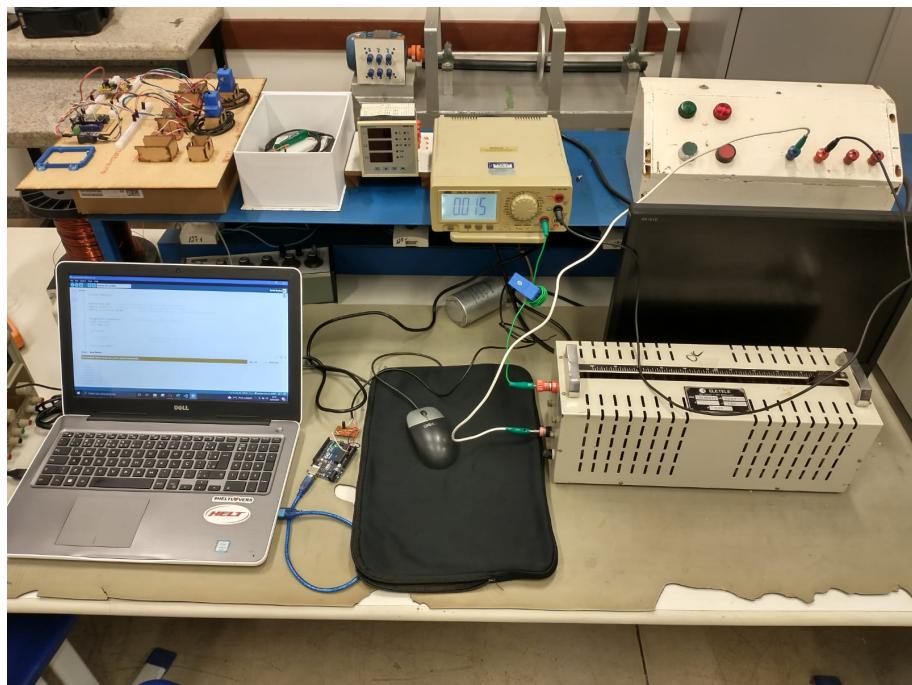


Figura 3.11 – Montagem do circuito para a calibração do módulo de aquisição de dados.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

A carga utilizada para aferição é possuir a característica de ser puramente resistiva, porém, é capaz de suportar até 500W, o que por sua vez resulta em:

$$P = \frac{V}{I} : 500 = \frac{127}{I} : I = 3,93A \quad (3.12)$$

Só é possível o cálculo direto como apresentado na Equação 3.12 pois estão sendo tratados como valores eficazes. Porém, foi perceptível que resistor de potência ELETELE não suportava a potência apresentada em sua placa, por isso, optou-se por trabalhar com impedâncias maiores.

Como isto acarreta numa menor potência dissipada, uma solução viável foi inserir mais espiras no circuito secundário do sensor SCT013. Primeiramente, para obter a linearidade do módulo de aquisição de dados, o resistor de potência foi configurado para uma resistência de aproximadamente 119Ω, devido ao seu comportamento, e foram coletadas 5 amostras para cada ponto, totalizando 50 amostras. Por fim, foi realizado a média simples, com o objetivo de minimizar o erro por fator humano. Na Tabela 3.1 é possível visualizar os valores obtidos.

Tabela 3.1 – Média dos dados para a curva de linearidade.

Calibração do Módulo de Aquisição de dados			
Espiras 2º (n)	Multímetro(A)	Sensor (A)	Multímetro Equivalente (A)
10	1,3115	13,015	13,115
9	1,3128	12,010	11,815
8	1,3134	10,532	10,507
7	1,3136	9,250	9,195
6	1,3134	8,014	7,880
5	1,3146	6,708	6,573
4	1,3166	5,398	5,266
3	1,3150	4,052	3,945
2	1,3152	2,838	2,630
1	1,3166	1,664	1,317

Utilizando um recurso do *software* MATLAB denominado *Curve Fitting*, foi identificada uma função de primeiro grau que engloba de maneira satisfatória os valores intermediários mensurados, conforme a Figura 3.12.

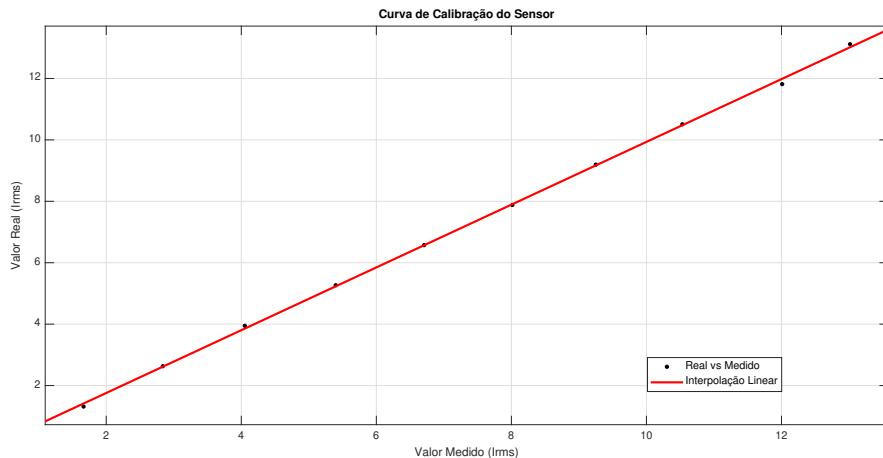


Figura 3.12 – Curva obtida através da regressão linear realizada. Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrita pela Equação (3.13):

$$V_m = 1,002V_r - 0,2856 \quad (3.13)$$

Na Figura 3.13 é apresentando um comparativo entre o valor mensurado pelo módulo de aquisição de dados e o valor real mensurado no multímetro de precisão.

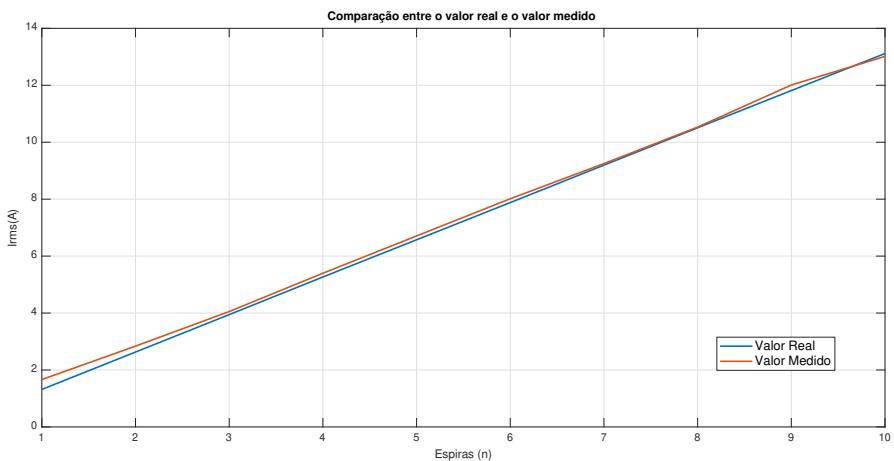


Figura 3.13 – Comparativo entre o valor medido e o valor real. Fonte: Elaborado pelo o autor.

O efeito da histerese é a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou, ou ainda, é a capacidade de preservar uma deformação efetuada por um estímulo. Podem-se encontrar diferentes manifestações desse fenômeno.

Com o intuito de quantificar o efeito deste fenômeno no funcionamento do instrumento, foram realizados dois tipos de testes, para curvas ascendentes e curvas descendentes.

O procedimento seguiu os mesmos passos vistos acima, porém, foi utilizada uma impedância de 82Ω , visando atingir correntes mais elevadas e minimizar os erros. Nas Tabelas 3.2 e 3.3 estão expostos os valores para as curvas ascendentes e descendentes.

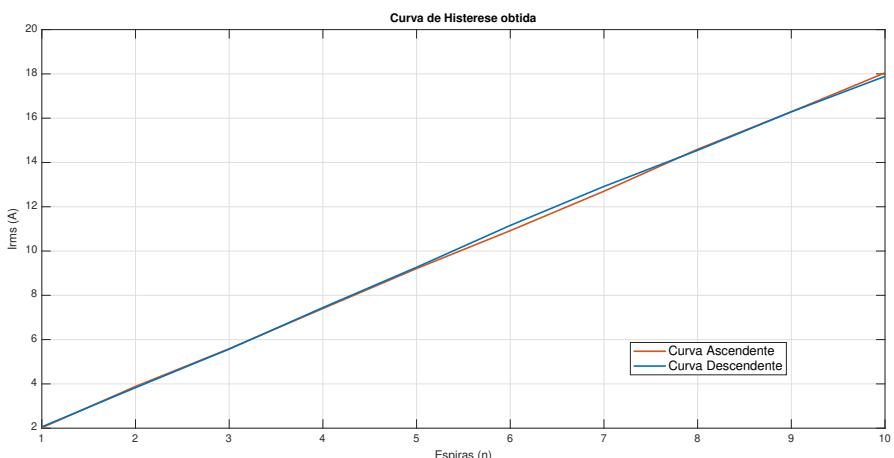


Figura 3.14 – Curvas de histerese. Fonte: Elaborado pelo o autor.

Tabela 3.2 – Dados para a curva ascendente da histerese.

Histerese: Curva ascendente			
Espiras 2º (n)	Multímetro(A)	Sensor (A)	Multímetro Equivalente (A)
1	1,788	2,020	1,788
2	1,794	3,887	3,589
3	1,796	5,587	5,388
4	1,798	7,403	7,192
5	1,796	9,210	8,980
6	1,796	10,920	10,776
7	1,797	12,700	12,577
8	1,799	14,597	14,389
9	1,798	16,290	16,179
10	1,795	18,047	17,953

Tabela 3.3 – Dados para a curva descendente da histerese.

Histerese: Curva descendente			
Espiras 2º (n)	Multímetro(A)	Sensor (A)	Multímetro Equivalente (A)
10	1,7910	17,8900	17,91
9	1,8017	16,2867	16,22
8	1,8063	14,5500	14,45
7	1,8047	12,9167	12,63
6	1,8117	11,1567	10,87
5	1,8100	9,2667	9,05
4	1,8117	7,4467	7,25
3	1,8117	5,5733	5,44
2	1,8133	3,8300	3,63
1	1,8153	2,0600	1,82

3.3.2 Dispositivo escravo

Em conjunto ao módulo de aquisição de dados se encontra o dispositivo escravo. Este dispositivo está presente no nível de campo conforme apresentado na Figura 2.10, e, conforme o fluxograma disposto na Figura 3.1, possui duas funções. Atuando tanto como a conversão do sinal analógico em uma série de dados digitais, como também opera como o escravo na rede industrial de comunicação. Dessa forma, este dispositivo é conectado ao módulo de comunicação industrial e ao barramento industrial de comunicação.

Como já foi dito, foi aplicado um Arduino Nano para executar essa atividade. Essa

escolha foi baseada nas tensões de operação dos níveis lógicos do Arduino Nano, sendo elas 0V para o nível lógico *LOW* e 5V para o nível lógico *HIGH*. Além disso, o Arduino Nano possui dois diferenciais que facilitam sua aplicação. Estão disponíveis 8 portas analógicas para a leitura dos sensores, dessa forma, ampliando as possibilidades de aplicação deste trabalho. Por exemplo, protocolo elaborado para este trabalho e o meio físico de transmissão permitem a conexão de até 32 itens, através das portas analógicas do Arduino Nano seria possível realizar uma malha de até 256 sensores. Mas, neste último caso é necessário verificar a viabilidade do protótipo para uma rede de sensores tão vasta assim.

Na Tabela 3.4 estão dispostos as conexões dos pinos do Arduino Nano com os dispositivos que integram o nível de campo apresentado na Figura 3.1. Além disso, as conexões também estão ilustradas em uma montagem realizada na Figura 3.15.

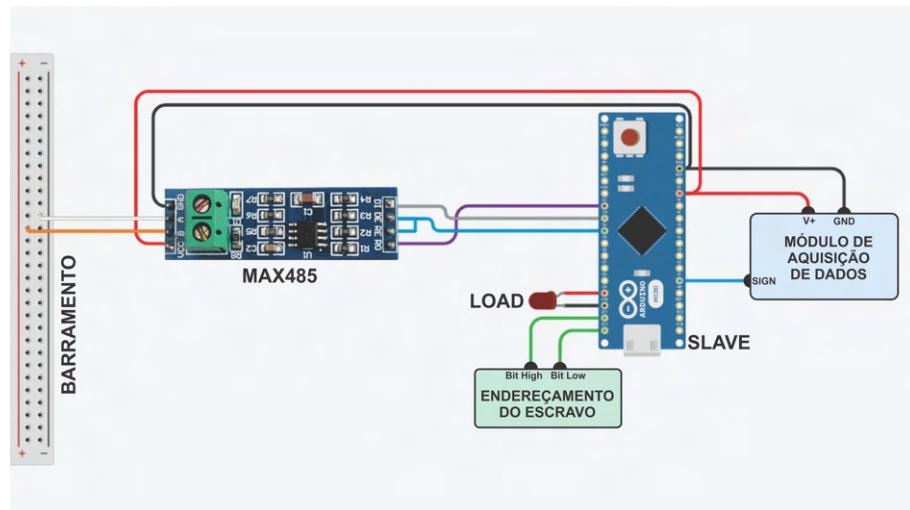


Figura 3.15 – Esquemático da montagem do dispositivo de campo. Fonte: Elaborado pelo o autor.

É importante frisar que o LED LOAD conectado aos pinos D9 e D10 do escravo atua tanto na sinalização da comunicação, como também representa a utilização do escravo para executar uma função externa, como acionar um sistema de relés de um motor presente na linha produtiva.

3.3.3 Protocolo de Comunicação

Conforme dito na Seção 3.2, o protocolo segue o modelo de mensagem e comunicação de um protocolo *Modbus*. Logo, foram construídos dois códigos para operar os microcontroladores através da IDE da Arcuino CC. O primeiro código para o mestre e o segundo

Tabela 3.4 – Conexões do dispositivo escravo.

Escravo	
Pino	Dispositivos
A0	Sinal do sensor
D2	RO do Módulo MAX485
D3	DI do Módulo MAX485
D4	RE e DE do módulo MAX 485
D9	Carga (Pode ser um atuador em campo)
D11	Pino de endereçamento de nível alto
D12	Pino de endereçamento de nível baixo
5V	Alimentação do módulo de aquisição de dados Alimentação do módulo MAX485
GND	GND do módulo de aquisição de dados
	GND do módulo MAX485
	GND (Aterramento geral de todo o circuito)
Vin	Alimentação do escravo (5V).

para os escravos. O código foi estruturado para seguir o fluxograma exibido na Figura 3.16.

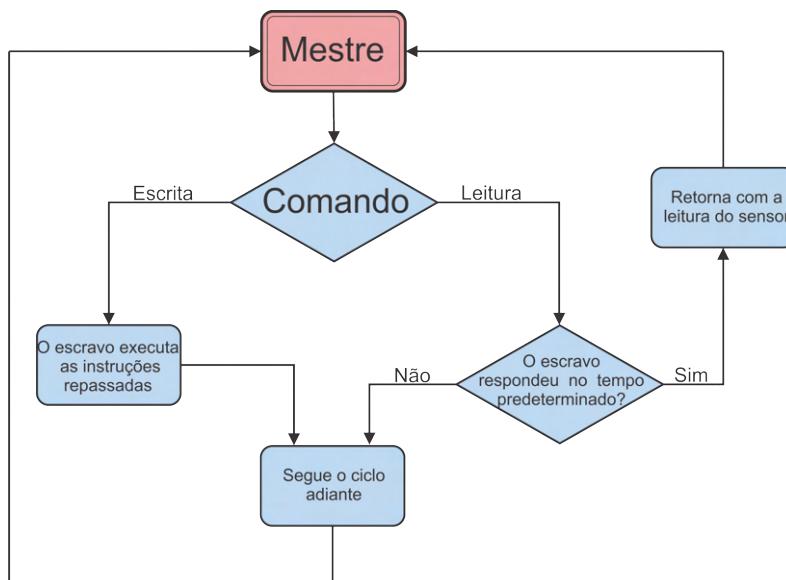


Figura 3.16 – Fluxograma de funcionamento do código. Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como no protocolo *Modbus*, o protocolo de comunicação aqui desenvolvido gera pacotes de dados seguindo o modelo de mensagem apresentado na Figura 2.14. O endereço do escravo é a primeira informação enviada no pacote com tamanho igual a 1 byte. Logo

em seguida é enviada a função a ser executada, contendo também *1 byte*. Já a informação está disposta em *2 bytes*, sendo o primeiro sobre o comando de escrita/leitura e o segundo *byte* para os dados.

A identificação para qual escravo o comando será enviado é efetuada em pacote de dados denominado datagrama. O datagrama foi construído a partir do exemplo da Figura 2.14, onde a mensagem se inicia pelo endereço do *slave* que se deseja comunicar, seguido pelo comando, mensagem e o byte de checagem. Na Tabela 3.5 é possível visualizar o pacote de dados do protocolo aplicado a esse trabalho.

Tabela 3.5 – Padronização do pacote de dados *software*.

Pacote de Dados (Datagrama)			
Endereço do Escravo	Comando	Mensagem	CS
1 Byte	1 Byte	2 Bytes	1 Byte

Para o endereço dos escravos, optou-se por realizar a distinção através da ligação física, utilizando os pinos digitais 11 e 12 no Arduino Nano. Dessa forma, é possível a utilização do mesmo código para os *slaves* conectados a rede, com limite de até 03 *slaves* tendo em vista o protótipo desenvolvido. Na Tabela 3.6 é apresentado os endereços utilizados, lembrando que o endereço 0 é reservado para a utilização da prática de *broadcast* e por isso não está listado.

Tabela 3.6 – Endereços utilizados para os dispositivos escravos.

Endereços dos Escravos				
Módulo	Físico		Endereço	Decimal
	Pin 15	Pin 16		
Slave 1	GND	POWER	01H	1
Slave 2	POWER	GND	02H	2

No caso desse sistema, foram definidas duas classes de comandos principais, escrita ou leitura. O comando de escrita instrui o escravo a executar uma função pré-determinada pelo mestre, como acionar um atuador em campo. Já o comando de leitura solicita uma resposta do escravo para o mestre, no caso desse trabalho se trata da leitura da malha de sensores.

Tabela 3.7 – Menu de comandos para os escravos.

Menu de comandos		
Função	Código	Decimal
Escrita	HIGH	01H
Leitura	LOW	02H

Complementando o que foi apresentado na Tabela 3.5, a mensagem é referente as instruções para a realização de um comando, como, por exemplo, qual saída deve ser ativada em nível alto. Por fim, é reservado 1 byte para a checagem do número de caracteres enviados, com o propósito de averiguar se a mensagem recebida está completa.

No fragmento de código a seguir é possível visualizar como é configurada o pacote de dados do dispositivo mestre para envio através da rede de comunicação industrial.

```

1 String datagrama( byte endereco, byte comando, byte io, byte valor ){
2     String pack = "";
3     pack = pack + endereco;
4     pack = pack + comando ;
5     pack = pack + io;
6     pack = pack + valor ;
7     return pack;
8 }
```

Listing 3.1 – Criando o pacote de dados.

Por último, completando o modelo de mensagem para o padrão *Modbus RTU*, é inserido a checagem da mensagem no momento de envio do pacote de dados. Conforme pode ser visualizado no fragmento de código abaixo.

```

1
2 void transmiteComCS( String mensagem ) {
3     byte CS = 0;
4     for (int i=0; i < mensagem.length(); i++ ) {
5         char cOne = mensagem.charAt(i) ;
6         CS = CS xor cOne;
7         Serial.print( cOne , HEX );
8         delay(1);
9         mySerial.print( cOne , HEX );
```

```

10     delay(1);
11 }
12
13 String toTx = toHex2( CS );
14 Serial.print( toTx );
15 mySerial.print( toTx );
16 delay(1);
17 }
```

Listing 3.2 – Checando a mensagem.

Como é desejado que a rotina de leitura dos sensores aconteça constantemente, os pacotes de dados contendo as funções a serem executadas em cada escravo foram configurados dentro da função *void loop* presente na Arduino IDE. Pode-se notar através do fragmento de código que os pacotes são escritos em decimais, porém, os dados são convertidos posteriormente em hexadecimais e enviados seguindo a tabela ASCII do mestre para o escravo. Maiores detalhes sobre a programação poderão ser visualizado no código completo disponibilizado nos anexos deste documento.

```

1
2 void loop()
3 {
4     // Escrita, no endero 1 (slave1),
5     pacote = datagrama( 1 , 1 , 1 , 1 );
6     transmiteComCS( pacote );
7     pisca();
8
9     leituraSlave1();
10
11    Serial.println("F");
12    pacote = datagrama( 1 , 1 , 1 , 0 );
13    transmiteComCS( pacote );
14    pisca();
15
16    // Escrita, no endero 2 (slave2),
17    pacote = datagrama( 2 , 1 , 1 , 1 );
```

```

18     transmiteComCS( pacote );
19     pisca();
20
21     leituraSlave2();
22
23     Serial.println("F");
24     pacote = datagrama( 2 , 1 , 1 , 0 );
25     transmiteComCS( pacote );
26     pisca();
27
28 }
```

Listing 3.3 – Rotina de leitura e escrita.

O ciclo apresentando no fragmento de código 3.3.3 se repete a cada 2 segundos. Isto se deve principalmente aos intervalos necessários para a biblioteca Emon.lib, utilizada para realizar os cálculos da corrente consumida, retornar com os valores obtidos pelo sensor. Porém, também fornece segurança e um período de tempo seguro para o trânsito de informações ao longo da rede industrial. Como se trata de uma aplicação industrial, a dinâmica dos eventos em uma planta industrial é lenta (como por exemplo silos, tanques, motores de grande cavalaria), um tempo de amostragem relativamente maior ajuda a reduzir o acúmulo desnecessário de dados na memória e não apresenta impactos negativos na confiabilidade dos dados.

3.3.3.1 Meio físico

Previamente, foi definido a utilização do módulo MAX485 para realizar a adequação dos sinais gerados tanto pelo mestre como pelos escravos aos níveis TTL, de 0V a 5V, nível baixo e nível alto respectivamente. Além disso, o módulo MAX485 já dispõe de um resistor de 120Ω nos terminais, dessa maneira, alcançado a impedância necessária para que transmissão de dados aconteça.

A Figura 3.17 demonstra os detalhes construtivos do barramento de comunicação aplicado para este protótipo.

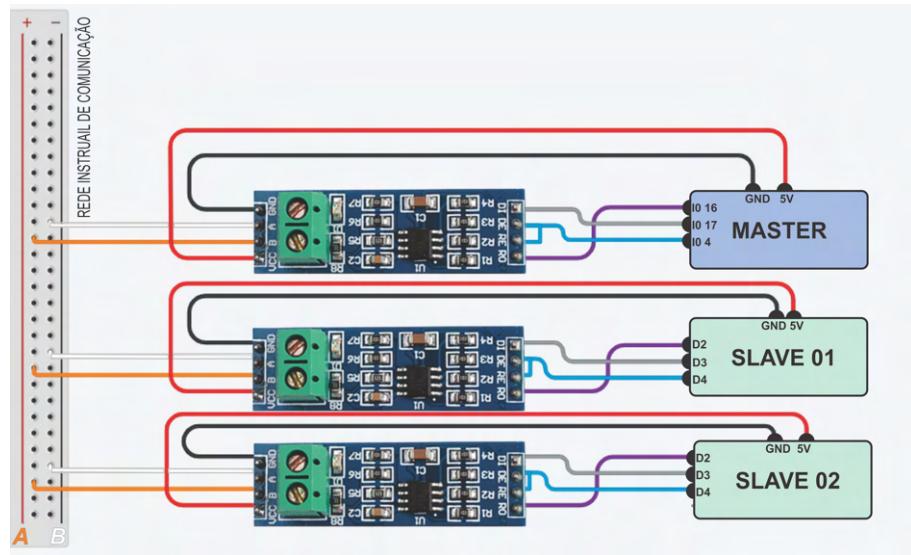


Figura 3.17 – Esquemático da montagem do barramento de comunicação industrial.

Fonte: Elaborado pelo o autor.

3.3.4 Dispositivo mestre

Na Seção 3.2 foi definido para o dispositivo mestre a utilização do microcontrolador ESP32 desenvolvido pela *Espressif Systems*. Com base no organograma apresentando na Figura 2.10, O dispositivo mestre neste trabalho é equivalente a um CLP no subnível de célula, o qual é parte integrante do nível de controle.

Ao contrário do Arduino Nano, o ESP32 opera com os níveis lógicos de *0V* para *LOW* e *3.3V* para *HIGH*, logo, foi necessário utilizar resistores de $22k\Omega$ e $33k\Omega$ para construir um divisor de tensão e impedir a queima do pino responsável pela recepção dos dados do barramento de comunicação industrial. O dimensionamento desses resistores foi realizado através da aplicação das Equações 3.6 e 3.7. Em relação a transmissão de dados, não é necessário aplicar nenhuma técnica para elevar a tensão do nível *3.3V* para *5V*, pois, o módulo *MAX485* consegue realizar esse ajuste, adequando os níveis de tensão ao padrão RS485.

Na Tabela 3.8 é possível visualizar qual a conexão que deve ser realizada entre os pinos da ESP32 e o barramento. Essa situação também está ilustrada na Figura 3.18.

3.3.5 Comunicação *Wireless*

A comunicação sem fio, *wireless*, foi elaborada através da programação do dispositivo mestre através do ambiente de desenvolvimento do Arduino.

Tabela 3.8 – Conexões do dispositivo mestre.

Escravo	
Pino	Dispositivos
A0	Sinal do sensor
GPI 16	RO do Módulo MAX485
GPI 17	DI do Módulo MAX485
GPI 04	RE e DE do módulo MAX 485
GPI 13	Carga (Indica o sucesso na comunicação)
VIN	Alimentação do mestre (5V)
	Alimentação do módulo MAX485
GND	GND (Aterramento geral de todo o circuito)
	GND do módulo MAX485

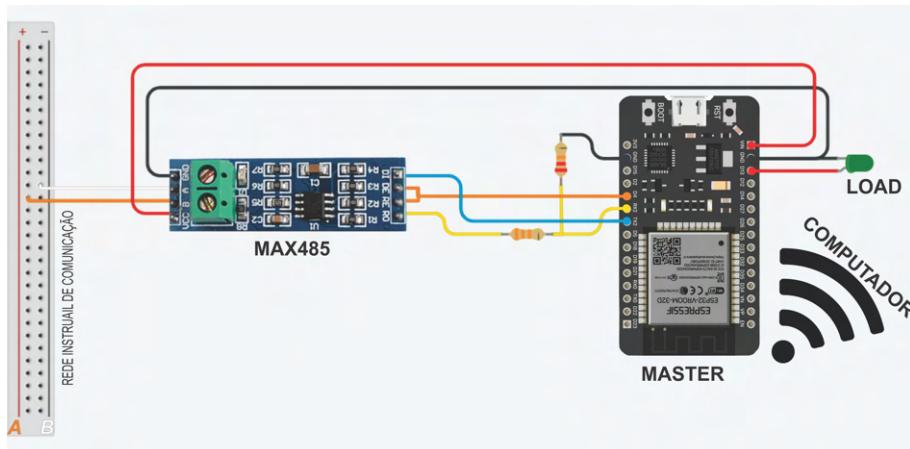


Figura 3.18 – Esquemático da montagem do dispositivo mestre. Fonte: Elaborado pelo o autor.

Primeiramente, foi definida que a comunicação Wi-Fi iria abranger apenas redes locais de internet. Essa escolha se deve ao fato de manter o sistema invulnerável para falhas de segurança, pois, os dados de consumo energético podem representar a saúde financeira da empresa. Outro ponto é a disponibilidade de servidores de internet para realização de uma aplicação *web*.

Logo, através de um roteador Wi-Fi foi configurada uma rede de internet local. Em seguida foi definido o *Web Server* e *Web Client*. Um *Web Server* pode ser definido como um local que armazena dados, processa páginas de *web* e responde a requisições de clientes. Enquanto isso, o *Web Client* trata-se de um navegador que realiza as requisições para a LAN (*Local Area Network*) (ENGINEERS, 2022). O dispositivo, ESP32, atua como o *Web*

Server no protótipo construído, respondendo as requisições elaborados pelo supervisório presente em um computador Windows conectado a mesma rede LAN, este último é o *Web Client*. Esta comunicação é realizada através do protocolo HTTP, que se origina do inglês *Hypertext Transfer Protocol*.

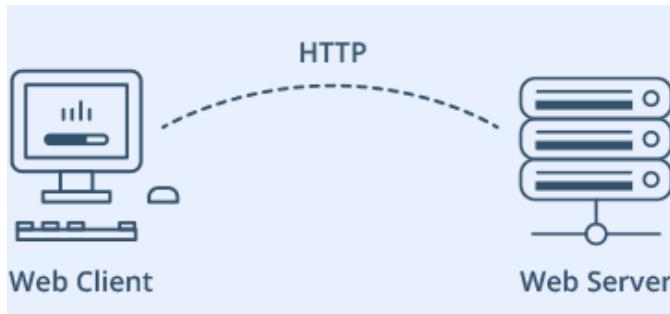


Figura 3.19 – Comunicação web através de uma rede LAN. Fonte: Engineers (2022).

Quando o computador realiza a requisição para o microcontrolador mestre, recebe uma resposta em forma de uma página em HTTP. Nesta página constam um pacote de dados que informa o endereço IP do mestre e os dados da leitura dos sensores.

Como a página em HTTP é formada por diversos caracteres, foram adicionados marcadores para a transmissão da mensagem principal, que são os dados lidos pelos sensores. Estes marcadores são os caracteres **IS** para o inicio da mensagem e **F** para o fim. O propósito desta página é apenas atuar como a ponte entre o dispositivo mestre e o supervisório.

Na Figura 3.20 é apresentado a página de *web* HTTP executando através de um navegador.

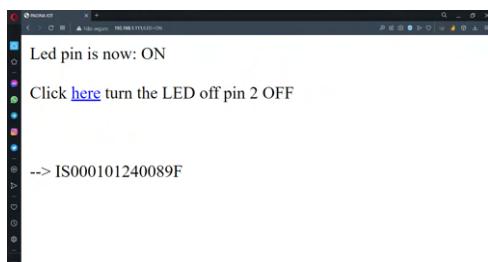


Figura 3.20 – Página HTTP apenas para troca de dados. Fonte: Acervo pessoal do autor.

3.3.6 Supervisório

O supervisório aqui desenvolvido possui como intuito apresentar ao gestor as informações de consumo de energia elétrica da planta em tempo real. O supervisório construído está presente dentro da classe de sistemas SGE, que possuem proximidade com os sistemas SCADA presentes na indústria (BERGER; INIEWSKI, 2012). Primeiramente, foi definido o *layout* desejado, optando-se por utilizar o formato *onepage*, onde todas as informações são exibidas em uma mesma página de forma sucinta e clara ao usuário. A partir disso, foi possível definir quais os *softwares* e linguagens de programação utilizadas para o supervisório, sendo eles a interface gráfica do *Windows Forms* em conjunto com a programação em C#.

O supervisório deve apresentar os seguintes dados:

- Leitura do consumo de energia elétrica em tempo real por setor;
- Leitura da demanda de potência elétrica em tempo real por setor;
- Tensão disponível das fontes alimentadoras por setor;
- Consumo de energia elétrica acumulado desde a inicialização do aplicativo por setor e total;
- Histórico de consumo de energia elétrica e demanda conforme data informada pelo usuário;
- Gerar um relatório em forma de planilha (csv) que pode ser utilizado como fonte de dados;

Para criar um projeto no Visual Studio 2019 Community, deve ao iniciar o programa clicar em novo projeto e escolher a opção ”Aplicativo do Windows Forms (.NET Framework). Para este trabalho foi empregada a versão 4.8. Logo após, é gerado um projeto com uma interface gráfica denominada *Forms* e um ambiente de programação.

Para atingir as funcionalidades previstas para o supervisório citadas acima, foram empregadas as seguintes ferramentas presentes na *Toolbox* do *Windows Forms*.

- **Chart:** Para gerar os gráficos;
- **PictureBox:** Adicionar imagens ao *design*;

- **Button:** Botões que disparam uma ação ao clicar;
- **TextBox:** Caixas de textos que apresentam mensagens ao usuário;
- **RichTextBox:** Semelhante ao anterior, porém, permite inserir parágrafos, imagens e demais informações;

A função **TextBox** é a aplicada para duas situações no projeto, tanto para apresentar informações recebidas da protótipo, quanto permitir ao usuário repassar informações ao código.

Na Figura 3.21 está apresenta a caixa de ferramentas do *Windows Forms* em destaque.

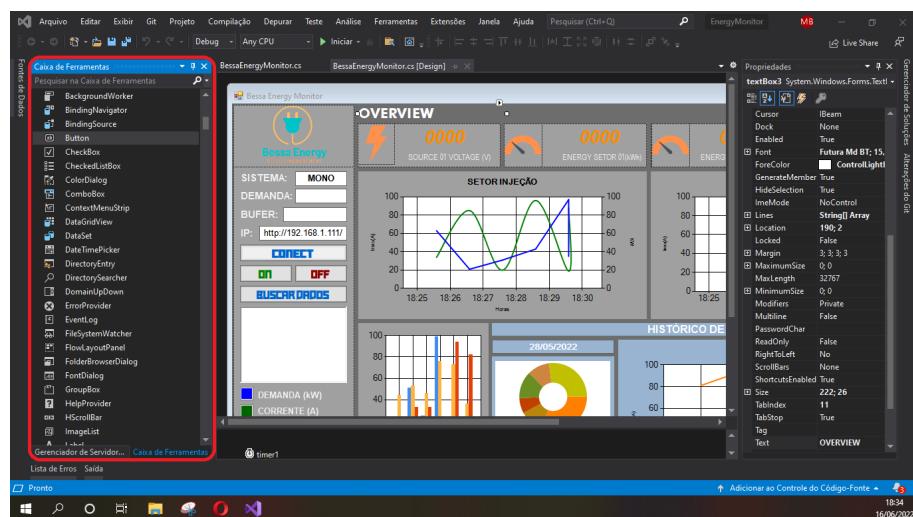


Figura 3.21 – *Toolbox*. Fonte: Arcevo pessoal do autor.

Em concomitância ao desenvolvimento do *design*, foi elaborado o código capaz de operacionalizar as funções citadas anteriormente. A programação desenvolvida é responsável por atuar como o *WebClient* apresentado na Figura 3.19. Logo ao iniciar o aplicativo *Windows*, o código realiza a requisição da página HTTP gerada pelo dispositivo mestre em campo. Dentre os caracteres enviados pela página, o código realiza a busca dos marcadores que delimitam o início e o fim da informação desejada. Essa informação é um pacote de 9 bytes que contêm o setor, tensão e correntes lidas naquele momento. Recebida a informação, é realizada uma checagem através de um Byte específico junto ao pacote e também verificado o tamanho do pacote recebido. Caso a confirmação seja positiva, a informação segue adiante na programação e são realizadas as manipulações necessárias para atingir as funcionalidades esperadas. Por fim, as informações são salvas em um arquivo para consultas futuras.

Na Figura 3.22 é possível verificar o funcionamento da aplicação desenvolvida. Nota-se, que é possível executar duas atividades em paralelo, a consulta de dados ao histórico e apresentação das leituras dos sensores em tempo real, considerando o atrasado gerado pela taxa de amostragem.

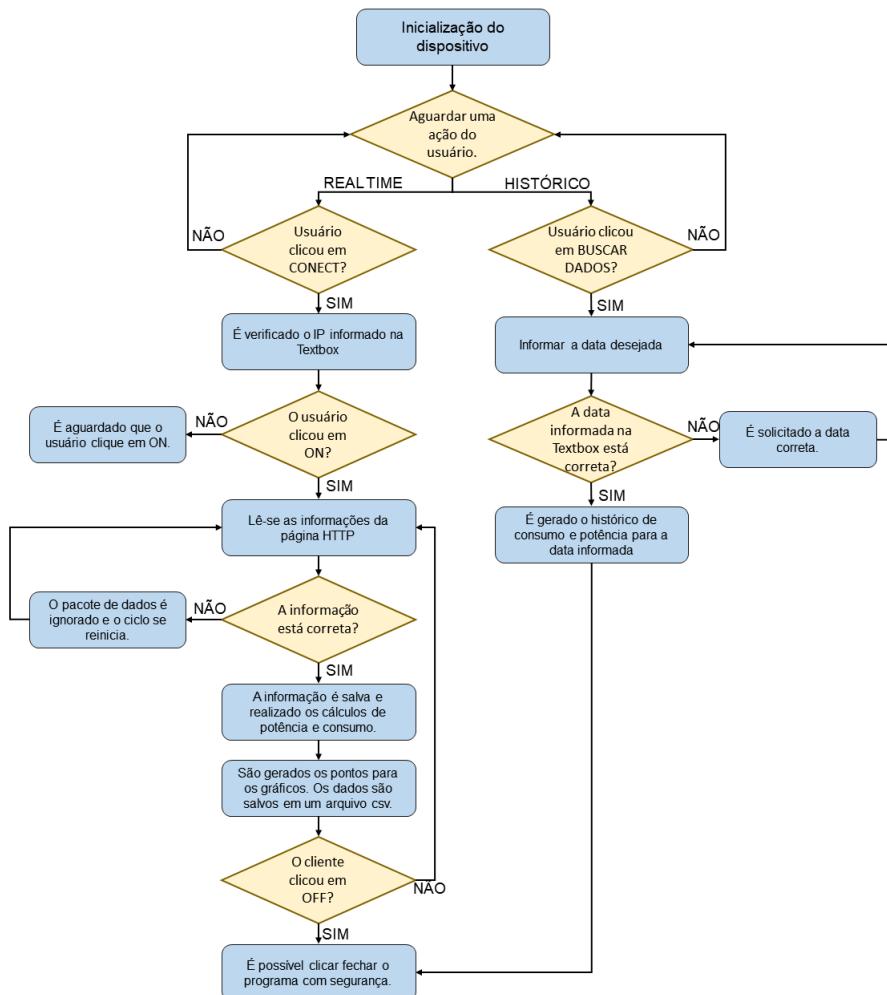


Figura 3.22 – Fluxograma de operação do código do supervisório. Fonte: Arcevo pessoal do autor.

As funções de leitura dos dados da página HTTP foi implementada através da classe *StreamReader*. Enquanto para a identificação dos marcadores da informação foi utilizada a função *IndexOf* da classe *String*. Logo após é realizar a verificação através de estruturas condicionais simples.

Obtido o dado correto, ele é desmembrado em três *subStrings* e convertido para uma variável numérica. As informações são então separados conforme o sensor lido e são efetuados os cálculos de potência e consumo de energia elétrica. Por fim, é apresentado de forma gráfica na aplicação.

Já para salvar os dados em um arquivo externo é utilizada a função *StreamWriter* presente na classe *System.IO*.

Quanto ao histórico, é realizada a leitura do mesmo arquivo externo também através das funções da classe *StreamReader*. Através de uma estrutura condicional são separados os dados referente a data informada e salvos em um vetor. Após isso, os gráficos são gerados. Não existe conflito desta função com o ciclo de escrita no arquivo, pois, a requisição de dados da página HTTP é interrompida durante a consulta ao arquivo de armazenamento.

Em todos os níveis de programação foram elaborados funções para garantir a confiabilidade dos dados e retornar mensagens ao usuário, caso necessário. Por fim, na Figura 3.23 é apresentado o layout finalizado.

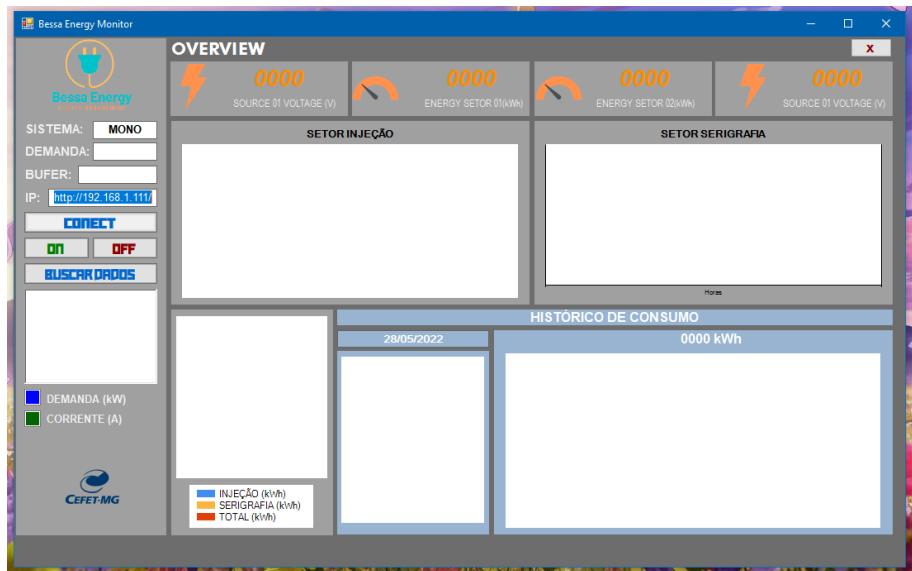


Figura 3.23 – Aplicação desenvolvida e nomeada como *Bessa Energy Monitor*. Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, Na Figura 3.23 é notado que o *layout* se divide em dois setores: Injeção e Serigrafia. Essas áreas compõe as principais divisões em uma indústria de fracos plásticos, sendo a injeção responsável por transformar o polietileno em fracos e a serigrafia responsável por estampar os rótulos nas embalagens. Essa motivação surgiu devido as experiências profissionais do autor.

3.3.7 Montagem

Primeiramente, foi elaborada uma base em MDF no qual o design remete a um ambiente industrial. Esse suporte conta com *cases* para a alocação dos Arduinos Nano e dos sensores, o que remete a determinado espaço numa planta industrial. Além disso, o dispositivo mestre, ESP32, ocupa o centro com o barramento de comunicação entre mestre e os escravos. Esse arranjo também facilitou na realização dos testes, oferecendo maior robustez e evitando incertezas geradas no protótipo.

Após isso, foi utilizada uma fonte YWRobot MB-V2. Esse equipamento é capaz de fornecer tensões de saída tanto em dois níveis, 3,3V e 5V e consegue suprir uma corrente máxima de até 700mA. Essa fonte atua principalmente como um regulador de tensão, mantendo nos padrões adequados para alimentar os microcontroladores, estes que operam com uma tensão contínua de 5V.



Figura 3.24 – Fonte YwRobot MB-V2. Fonte: YWROBOT... (2013)

Por sua vez, a fonte YwRobot MB-2 foi alimentada por um adaptador AC/DC Samsung Bivolt capaz de oferecer 12V com corrente de até 2A.

3.4 Testes

3.4.1 Simulações

Após a definição de todos os materiais e métodos a serem aplicados neste trabalho, foram simulados os módulos que eram possíveis através da plataforma de um *software* de simulação de circuitos eletrônicos. Logo, foi construída a rede de comunicação industrial com um mestre e três escravos (Nota-se que o protótipo possui apenas dois escravos devido à disponibilidade de dispositivos). Os dispositivos eletrônicos utilizados foram: CI's ATMEGA328P, módulo MAX487, circuito oscilador com cristal e o circuito eletrônico desenvolvido no Tópico 3.2.1 desse documento. O primeiro componente é utilizado para

representar tanto o mestre como os escravos na rede de comunicação, lembrando que no protótipo é utilizado o ESP32 para desempenhar a função de mestre. Já em relação ao sensor SCT013, foi necessário adotar fontes de corrente para a sua representação. O esquemático da rede de comunicação simulada, assim como a conexão realizada entre os dispositivos, pode ser visualizado na Figura 3.25.

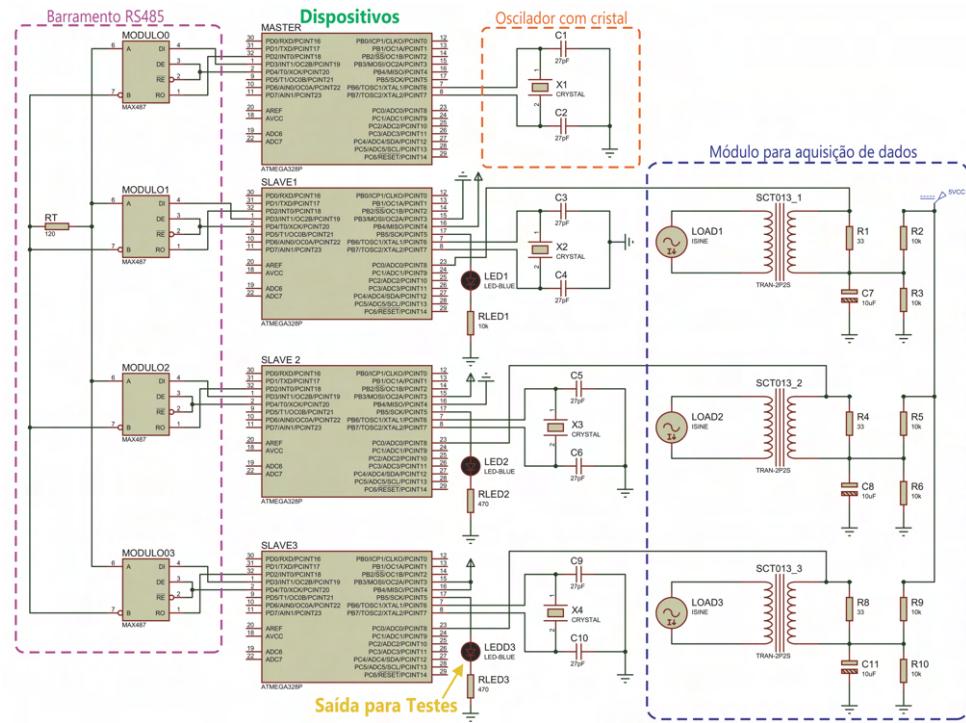


Figura 3.25 – Rede de comunicação simulada construída em um *software* de simulação de circuitos eletrônicos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram executados comandos para acionar uma carga conectada aos escravos representada por um LED. Após o fim das simulações, não foi verificado nenhum erro fatal nas simulações seguindo adiante para as montagens e testes reais.

3.4.2 Testes do protótipo

Os testes seguiram a lógica apresentada na construção do protótipo. Primeiramente, foi submetido aos testes o módulo para aquisição de dados de forma separada.

Cada circuito elaborado conforme apresentado na Figura 3.10 foi submetido a testes isolados, de forma a garantir a sua funcionalidade.

Depois de verificar o funcionamento adequado dos módulos de aquisição de dados, os testes encaminharam-se para a rede de comunicação industrial. Em um primeiro momento, foi examinada a capacidade dos escravos de executarem uma ação perante um

comando simples do mestre. Logo após, foram adicionadas a função de escrita do escravo na rede de comunicação. Como o ciclo de operação é por *polling* é necessário que aconteça o perfeito sincronismo nos momentos de escrita de cada elemento na rede de comunicação.

Através dos testes, foi obtido de forma experimental o tempo necessário para que cada ciclo de leitura e escrita ocorra. No caso do comando de leitura dos sensores, é necessário para o dispositivo escravo o período mínimo de $500ms$ para interpretar o comando do mestre, realizar a leitura dos dados do sensores, gerar o valor estipulado da corrente consumida através da biblioteca EmonLib, construir o pacote de dados e, finalmente, escrever os dados na rede.

Para verificar quais dados estão trafegando no barramento de comunicação industrial, todas as mensagens foram duplicadas para as portas padrões de comunicação serial dos microcontroladores e lidas através de um terminal serial simples. Conforme pode ser visto na Figura 3.26 .

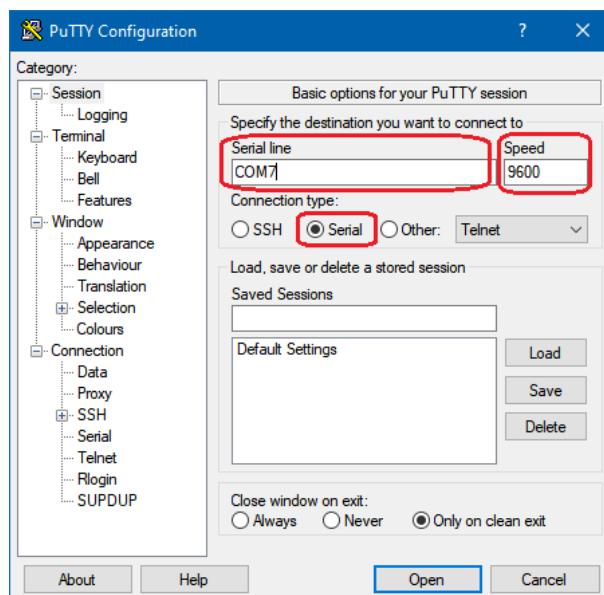


Figura 3.26 – Configurando o terminal de leitura para validar os dados da rede de comunicação do protótipo: Acervo pessoal do autor.

Para que seja realizada a leitura é necessário que seja verificado em qual porta de comunicação está alocado o microcontrolador e a velocidade de comunicação do barramento, a qual foi definida em $9600bps$. É possível descobrir qual a porta COM que o microcontrolador está conectado através do **Gerenciador de Dispositivos**, em um computador *Windows*. Isso está demonstrando na Figura 3.27.

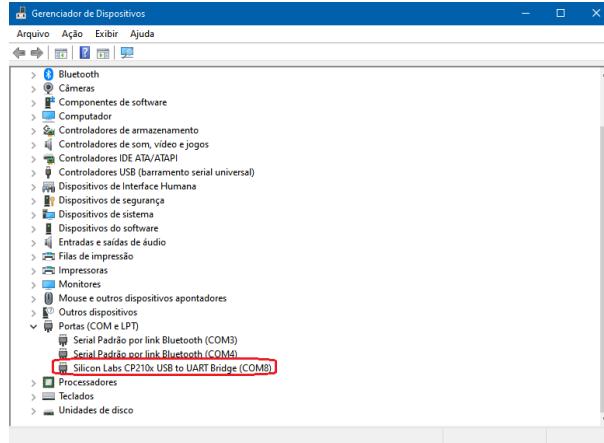


Figura 3.27 – Descobrindo a porta COM do microcontrolador conectado ao computador.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Por fim, sucederam os testes para a comunicação *wireless* utilizando a ESP32 e o *browser* de um computador Windows. Detalhes mais ricos sobre os testes utilizados estão presentes na seção de Resultados deste documento. Na Figura 3.28 é possível observar o protótipo energizado.

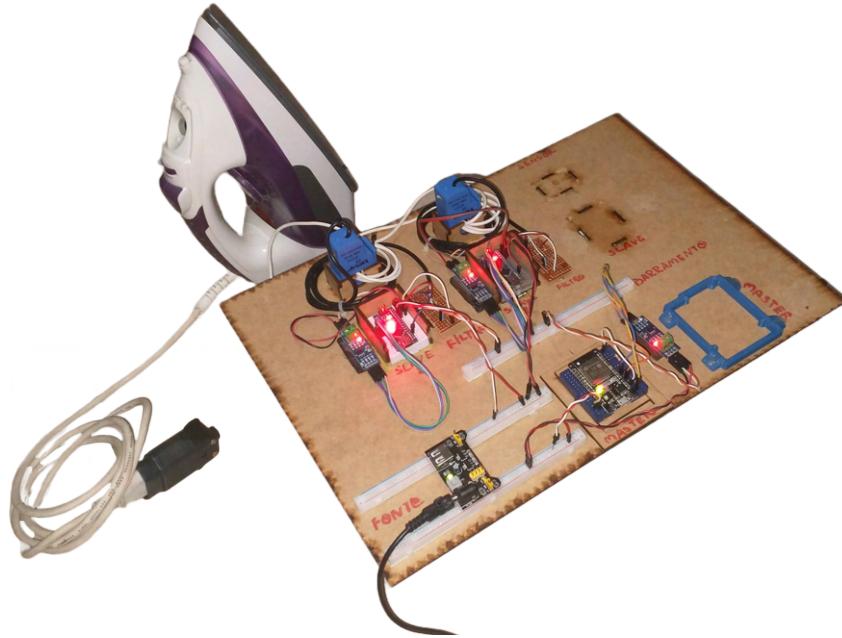


Figura 3.28 – Protótipo energizado. Fonte: Acervo pessoal do autor.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo estão presentes os resultados alcançados ao longo do desenvolvimento desse projeto.

4.1 Módulo de aquisição de dados

Para a validação do módulo de aquisição de dados, o circuito para a conversão do sinal foi arranjado em uma placa de ensaios em conjunto com o sensor SCT013 e um Arduino Uno, o qual aqui atua como o conversor Analógico/Digital. Foram utilizadas lâmpadas incandescente com potência de 70W como cargas de teste nesse primeiro momento, com o enfoque em aparelhos que apresentam cargas majoritariamente resistivas. Para cada situação foram coletada 25 amostras com um intervalo de 100ms entre elas, descartando as 5 primeiras amostras para evitar interferências no resultado final.

Tabela 4.1 – Testes realizados para aferição de potência e corrente consumida.

Equipamentos	Pot. Declarada (W)	Pot. Aferida (W)	Cor. Aferida (A)
1 Lâmpada	70W	68,33W	0,54A
2 Lâmpadas	140W	137,51W	1,08A
3 Lâmpadas	210W	215,45W	1,70A

Em relação a potência fornecida pelo fabricante, conforme a Tabela 4.1, percebe-se que existe uma variação por volta de $\pm 2\%$. No entanto, é valido lembrar que o sensor SCT013 possui um grande *range* de medição, sendo adequado para aplicações onde são aferidas correntes eficazes significativamente superiores ao valores aferido nos testes. Sendo as-

4.1. MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

sim, não é necessário uma sensibilidade muito elevada. Além disso, existe a limitação relacionada a resolução da entrada analógica do microcontrolador.

Avançando nessa linha de raciocínio, cada variação de 1A no circuito primário do sensor de corrente gera uma corrente no enrolamento secundário igual a 0,05mA, conforme a Equação 2.1. Aplicando este resultado na Equação 4.1 é obtida a seguinte tensão sobre o resistor de carga (R_L):

$$V_{rms} = R \cdot I2_{rms} \Rightarrow V_{pico} = 33\Omega \cdot 0,05mA \cdot \sqrt{2} = \pm 23,33mV \quad (4.1)$$

A entrada de dados analógico do microprocessador ATMEGA328P possui 10 bits de resolução (ATMEL, 2008), a leitura está entre 0 e 5V, logo, cada degrau representa 4,88mV de variação. Dessa forma, em algumas situações o dispositivo pode não mensurar variações na corrente menores que um décimo de ampere, justificando assim os desvios apresentados na tabela anterior.

No entanto, quando ponderada que a aplicação desse projeto será para o meio fabril, onde estão presentes equipamentos que demandam grandes correntes, variações como as vistas ao decorrer dos testes podem ser desconsideradas sem maiores problemas.

Por fim, é possível obter uma análise gráfica com os dados obtidos através do circuito eletrônico projetado. Na Figura 4.1 apresenta a corrente demandada por uma carga equivalente de 560W, para isso, foi utilizada uma carga resistiva de 70W e construída 8 espirais em torno do núcleo ferrítico do sensor.

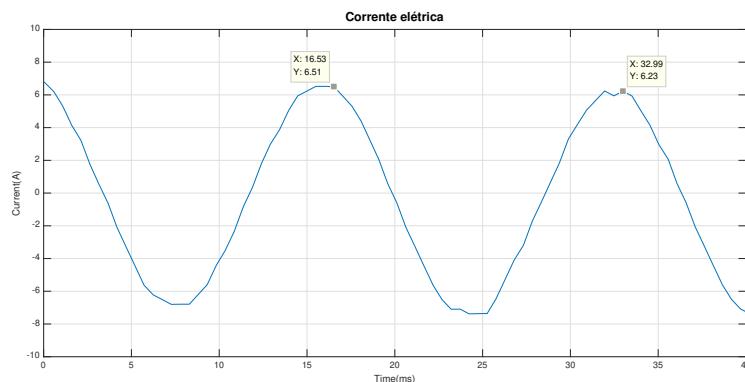


Figura 4.1 – Corrente elétrica alternada demandada por uma carga equivalente a 560W.

4.2 Comunicação Mestre/Escravo

A comunicação entre os dispositivos presentes em campo e a central de processamento de dados está no terceiro nível de desenvolvimento desse trabalho, conforme o fluxograma apresentando na Figura 3.1. Além disso, a comunicação Mestre/Escravo representa a interação entre os níveis de campo e de controle em um organograma de um sistema industrial, e, sua robustez é essencial para o bom funcionamento do sistema.

Através do terminal serial *Putty*, é possível analisar a transferência de informações na rede industrial de comunicação. Logo, primeiramente foi enviado um comando para o escravo 01 acionar uma carga na saída, representada por um LED. Sabe-se que o comando de escrita em uma das portas do microcontrolador é "1", de acordo com a Tabela 3.7. Logo, a escrita no escravo 01 acontece através do pacote de dados: **1,1,1,1**. Este indica que a porta "01", do escravo 1 deve estar em nível lógico ON. Percebe-se aqui que a mensagem enviada é referente a ativar a saída 1. Na Figura 4.2, é possível observar este comando sendo apresentado primeiro em decimal, logo após, sendo convertido conforme sua posição na tabela ASCII, e, posteriormente é realizada a checagem do pacote de dados.



```

PuTTY (inactive)
1111
!
>3131313100
>> 1 1 1 1
SOU EU!!
3130313101 cs processing

```

Figura 4.2 – Comandos de escrita para o escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso o pacote de dados recebido pelo escravo esteja correto, o comando é executado. Na Figura 4.3 pode ser visto que a saída referente ao comando 01 foi acionada.

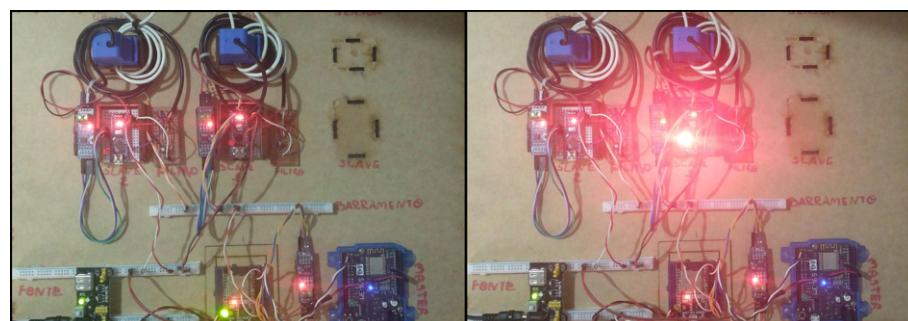


Figura 4.3 – Comando executado pelo escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. COMUNICAÇÃO MESTRE/ESCRAVO

O mesmo foi replicado para o escravo 02. Porém, agora o pacote de dados será: **2,1,1,1**. Essa alteração se deve ao endereço do escravo 02, os demais comandos são mantidos os mesmos.



```
PutTY (inactive)
2111
!
>3231313103
>> 2 1 1 1
3230313102 cs processing
```

Figura 4.4 – Comandos de escrita para o escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso o pacote de dados recebido pelo escravo esteja correto, o comando é executado.

Na Figura 4.5 pode ser visto que a saída referente ao comando 01 foi acionada.

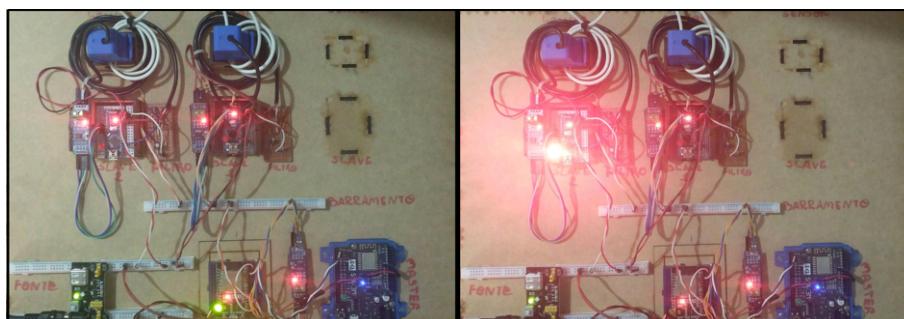


Figura 4.5 – Comando executado pelo escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para desativar a saída, os pacotes de dados para a execução dos comandos são aplicados **1,1,1,0** e **2,1,1,0** para os escravos 01 e 02 respectivamente. Estas mensagens significam que a saída 01 do microcontrolador estará em nível lógico baixo a partir de diante. Os comandos para inativar uma saída dos escravos estão apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7.



```
PutTY (inactive)
1110
!
>3131313001
>> 1 1 1 0
SOU EU!!
```

Figura 4.6 – Comandos para inativar uma saída no escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor.



```
PUTTY (inactive)
2110
!
>3231313002
>> 2 1 1 0
```

Figura 4.7 – Comandos para inativar uma saída no escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os comandos acima possibilitam ao protótipo desenvolvido uma grande gama de possibilidades e a robustez necessária para ser aplicado em soluções de automação e instrumentação industrial. No entanto, o propósito neste trabalho é realizar a leitura de uma malha de sensores. Visando executar essa função, é utilizado o comando padronizado para leitura presente na Tabela 3.7. Então, os comandos para a leitura dos dois escravos que compõe o protótipo são: **1,0,1,1** e **2,0,1,1**. Quando estes comandos são solicitadas aos escravos, estes respondem com uma mensagem padronizada de 12 *bytes*, que segue o padrão: Endereço (4 *bytes*), Tensão no ponto (4 *bytes*) e Corrente instantânea (4 *bytes*). Nas Figuras 4.8 e 4.9 é possível visualizar as respostas dos escravos.



```
PUTTY (inactive)
1011
!
>3130313101
>> 1 0 1 1
000101240028 cs_processing
```

Figura 4.8 – Comando de leitura e resposta do escravo 01. Fonte: Elaborado pelo autor.



```
PUTTY (inactive)
2011
!
>3230313102
>> 2 0 1 1
000201242439 cs_processing
```

Figura 4.9 – Comando de leitura e resposta do escravo 02. Fonte: Elaborado pelo autor.

Também é importante citar que a cada comando é executado a checagem se a mensagem foi recebida de forma íntegra. Em caso afirmativo, é emitido um sinal de "!" na rede. Caso a mensagem chegue de forma incompleta para o escravo, ou o comando não esteja catalogado dentre as suas funções, é emitido um sinal de "?" no barramento, sinalizando a falha na comunicação.

4.3 Supervisório

O supervisório complementa os resultados obtidos até o momento como o nível de fábrica, sendo este, o resultado mais relevante. A partir dele é possível ao operador visualizar em tempo real os dados de consumo de energia elétrica da unidade industrial, tanto em sua totalidade como também por setores. Além disso, o gestor também pode verificar o histórico de consumo da indústria em qualquer outra data desde a implantação do sistema. Essa é uma funcionalidade de extrema importância pois as indústrias de grande porte, usualmente, optam por comprar pacotes de energia através do Mercado Livre de Energia. Como citado anteriormente neste documento, os contratos tipo A efetivados através do Mercado Livre de Energia são compostos por dois tipos de cobranças, a energia elétrica consumida de fato em KWh e a demanda das instalações em KW. Logo, caso durante o mês a potência instantânea demandada em uma instalação industrial ultrapasse o previsto na demanda no ato da contratação, esta empresa estará sujeita a aplicação de multas.

Dessa forma, o supervisório desenvolvido possui como propósito se assemelhar a um sistema SGE.

4.3.1 Inicialização

Ao iniciar a aplicação se faz necessária adicionar duas informações ao supervisório: Tipo do sistema e IP referente ao dispositivo de campo. O supervisório inicia com o tipo de sistema "MONO"pré-configurado, o qual se refere ao sistema monofásico. Para os sistemas bifásicos e trifásicos são utilizadas as nomenclaturas "BI"e "TRI"respectivamente. Caso o usuário deseje alterar o sistema e digitar de forma incorreta, o programa irá instruí-lo a preencher da forma correta e continuará coletando dados para o sistema previamente configurado.

Após isso, é repassado o endereço de IP do dispositivo de controle presente em campo. Com estes dados em posse, é possível então conectar ao dispositivo através da rede LAN e iniciar a captura dos dados.

O processo de inicialização esta apresentado na Figura 4.10. Nota-se que é apresentada uma mensagem ao usuário a cada etapa realizada.

Como nessa etapa o usuário possui um papel ativo, são geradas mensagens de erro no caso do preenchimento dos dados de maneira incorreta e as informações são tratadas de

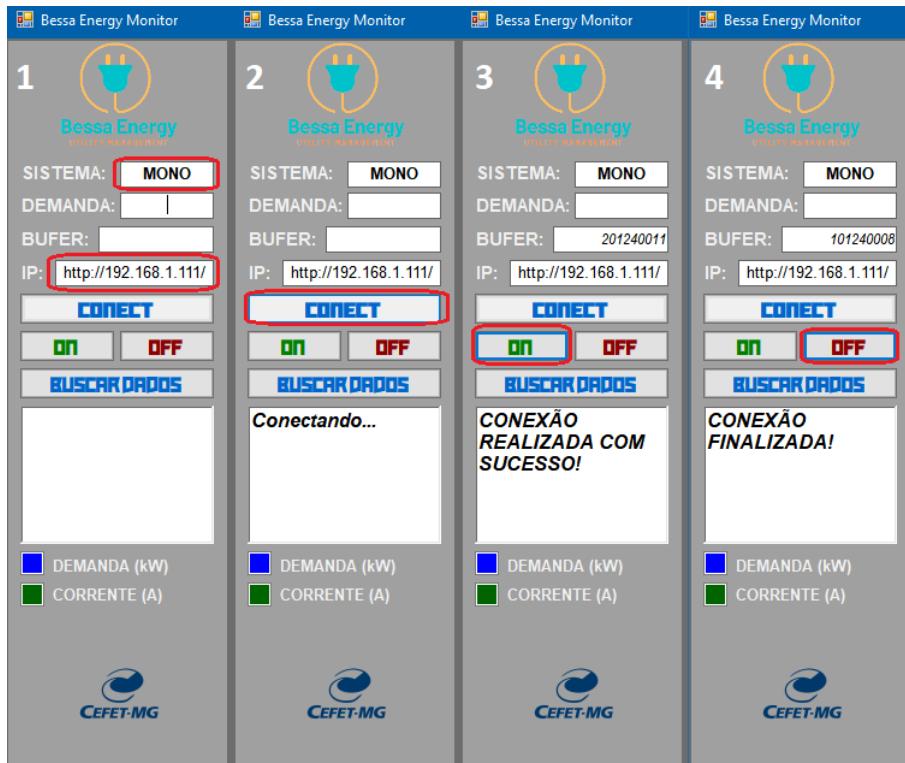


Figura 4.10 – Inicialização do aplicativo *Windows*. Fonte: Elaborado pelo autor.

forma que não interrompa o funcionamento do programa.

Na Figura 4.11 estão expostas as mensagens de erros para duas situações onde o preenchimento das informações é realizado de forma incorreta.

4.3.2 Apresentação dos dados em tempo real

A principal função do sistema de gestão de energia desenvolvido é fornecer dados de consumo energético em tempo real, considerando o atraso da taxa de amostragem. Desse modo, parcela superior do supervisório foi estruturada para apresentar os dados de tensão e potência atuais demandados nas fontes provedoras de energia para aquele setor. Por exemplo, em uma indústria isso representaria que os sensores estariam alocados nos Quadros de Distribuição de Circuitos, conhecidos como QDC's. Mesmo que a mensuração da tensão não esteja envolvida neste projeto, já foi reservado este espaço para a continuidade do trabalho.

Para a obtenção dos resultados foram selecionados eletrodomésticos que possuem como características serem cargas predominantemente resistivas. O propósito é se aproximar das cargas presentes no modelo de indústria selecionada para este supervisório, e princi-

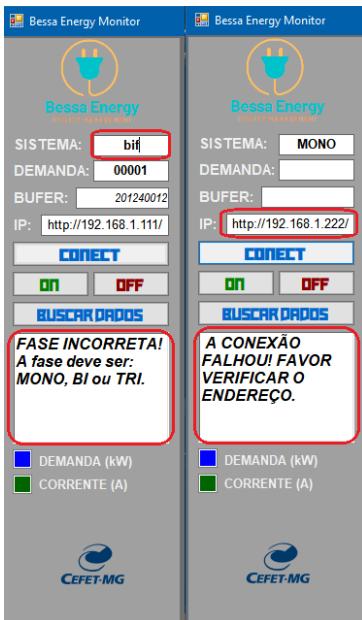


Figura 4.11 – Mensagens de erros possíveis durante a inicialização. Fonte: Elaborado pelo autor.

palmente validar o funcionamento do dispositivo. Logo, assegurando a característica da carga, é utilizado um recurso para representar uma carga de baixa impedância, o qual é adicionar espiras no enrolamento secundário do sensor. É válido pontuar que os sensores foram calibrados conforme o apresentado 3.3.1.1, logo, os dados apresentados pelo supervisório possuem alto grau de confiabilidade e o propósito dessa seção é apresentar a funcionalidade do sistema de visualização dos dados.

Primeiramente, na Figura 4.12 é apresentado o resultado para uma carga resistiva de potência equivalente a 1000W no setor 01, enquanto no setor a carga seria de 2000W.

Em destaque estão apresentados os dados referente a máxima demanda percebida pelo sistema, o consumo total realizado e os valores de corrente e potência elétrica mensurados por setores atualizados com o período de dois segundos. Todos os valores de potência estão apresentando em kW , enquanto os valores de consumo utilizam como unidade kWh , assim como é praticado nas faturas de energia elétrica presentes nos contratos do grupo A.

Os gráficos por setores apresentam no eixo vertical primário o valor da corrente eficaz mensurada em A , enquanto trazem no eixo vertical secundário o valor da potência real em W , sendo essa a única exceção. Foi necessário apresentar os valores de potência em W para facilitar a visualização durante os testes.

Maiores discussões quanto aos dados obtidos estão presentes ao final desta Seção.

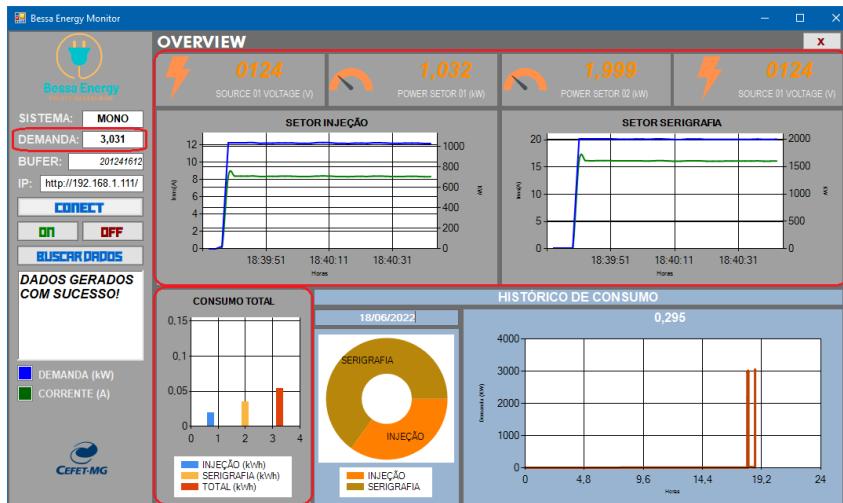


Figura 4.12 – Mensuração de duas cargas resistivas de 1000W e 2000W. Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, o sistema foi submetido para mensurar uma carga de 800W no setor 01 e de 1600W no setor 02. Os resultados estão presentes na Figura 4.13. Este caso apresentou maior distanciamento da potência declarada pelo fabricante do equipamento.

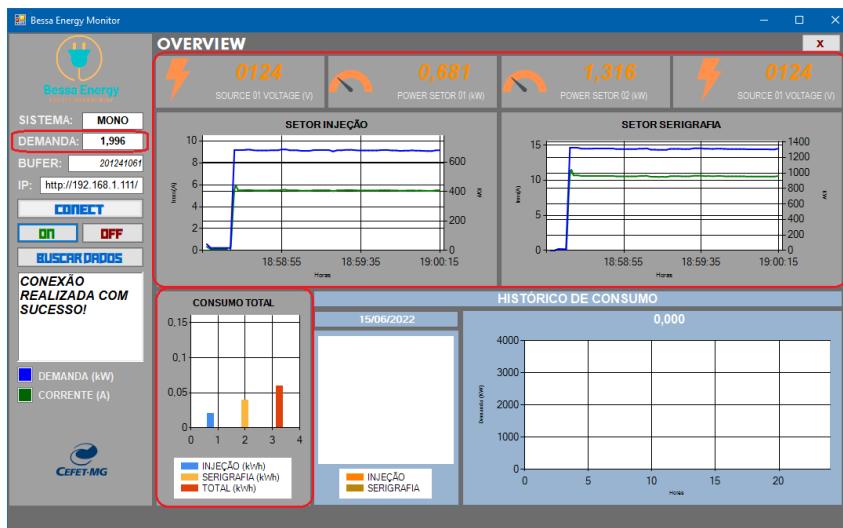


Figura 4.13 – Mensuração de duas cargas resistivas de 800W e 1600W. Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foram comparados os dois sensores utilizados para esse trabalho. No caso os dois sensores compõem os módulos de aquisição de dados de seus respectivos dispositivos escravos na planta. Esses módulos foram submetidos a uma carga de 1000W. Na Figura 4.14 é possível observar os resultados obtidos.

Por fim, com o propósito de aproximar as condições de teste às de um processo indus-

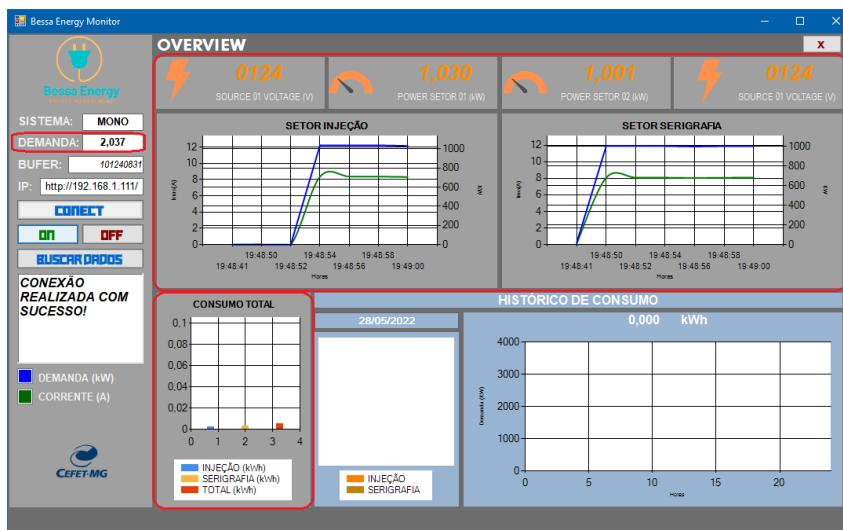


Figura 4.14 – Comparação entre os sensores. Fonte: Elaborado pelo autor.

trial, o sistema desenvolvido também foi testado com uma carga indutiva, sendo ela, um motor monofásico conforme a disponibilidade do autor. Na Figura 4.15 é apresentado o resultado obtido no teste através do sensor 01.

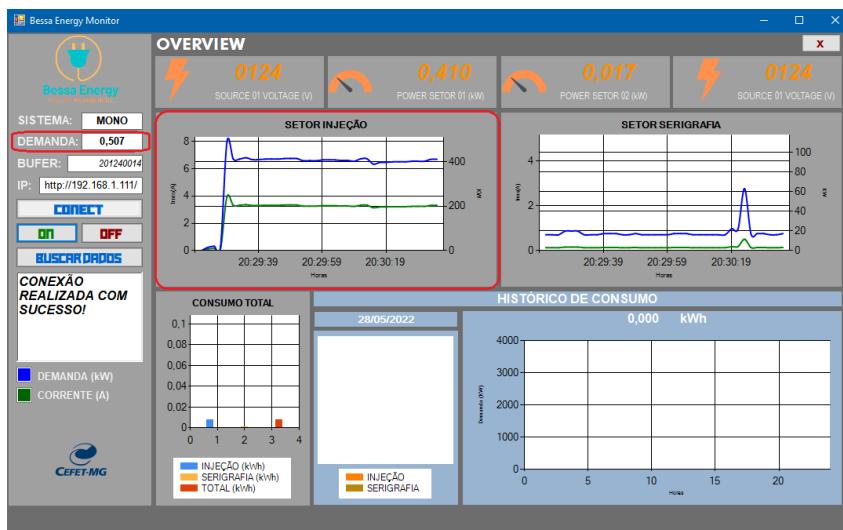


Figura 4.15 – Mensuração com uma carga indutiva. Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando o sistema mensura uma carga majoritariamente indutiva, é possível observar a característica indutiva nos dados obtidos. Cargas indutivas, como motores CA, possuem como característica apresentarem alta corrente de partida em relação a nominal, principalmente, quando analisado a partida direta e com carga (CHAPMAN, 2013). Outro ponto que pode ser observado na Figura 4.15 é que o sistema armazena o dado da demanda máxima, sendo esse um importante parâmetro para clientes do grupo A.

No caso do resultado apresentado na Figura 4.15, é notável a elevada corrente na partida, em torno de 25% acima da nominal, porém, este valor ainda é inferior a realidade devido ao período de amostragem do protótipo. Também está em destaque nessa imagem a demanda aferida, esse valor representa a máxima potência em kW atingida e é um dado estratégico para definir por exemplo o momento de partida de vários motores e cargas que compõem uma linha de produção.

Na Tabela 4.2 estão apresentados alguns resultados obtidos nos testes.

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados obtidos.

RESULTADOS OBTIDOS				
	Sensor 01		Sensor 02	
	P. Declarada (W)	P. Obtida (W)	P. Declarada (W)	P. Obtida (W)
01	1000	1032	2000	1999
02	800	681	1600	1316
03	1000	1030	1000	1001
04	600	507	-	-

Através dos resultados apresentados nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e na Tabela 4.2, fica claro que a funcionalidade do sistema é atingida, sendo possível a leitura dos dados atualizados conforme as condições presentes em campo. Como a credibilidade dos dados gerados foi assegurada através do processo de calibração dos sensores, é possível inferir que a potência declarada dos equipamentos utilizados para os testes estão ligeiramente acima do valor real mensurado.

4.3.3 Histórico e arquivo de dados

Uma das principais funções previstas para o sistema de gestão de energia desenvolvido é a possibilidade de visualizar os dados referente ao consumo energético diário praticado, em qualquer data que esteja armazenada nos arquivos do banco de dados.

Para este fim, foi reservada a parcela inferior do *layout* do supervisório. Inclusive, gerando destaque para essa seção devido a apresentação com uma cor distinta do restante do *design*.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 são apresentados em destaque o histórico de potência mensurada, por setor e total, e consumo de energia elétrica total referente aquela data.

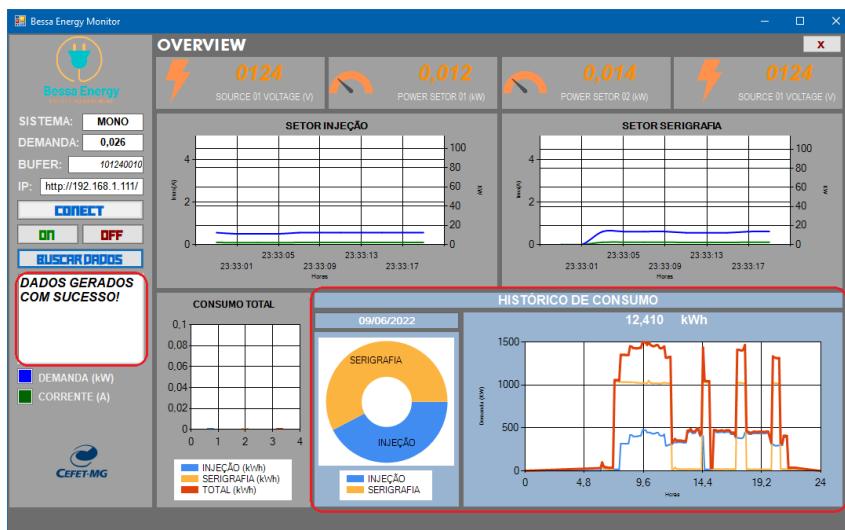


Figura 4.16 – Histórico de dados de potência e consumo energético para a data de 09 de Julho. Fonte: Elaborado pelo autor.

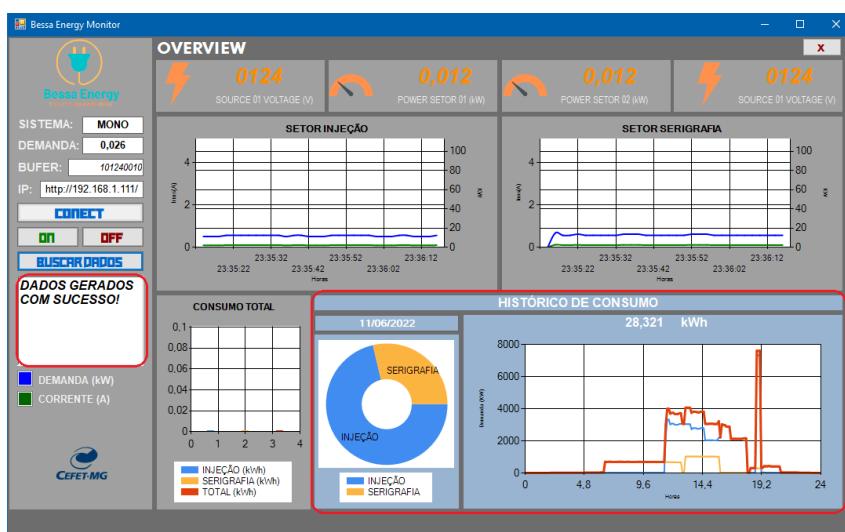


Figura 4.17 – Histórico de dados de potência e consumo energético para a data de 11 de Julho. Fonte: Elaborado pelo autor.

A interface também apresenta mensagens de erros caso o usuário busque por uma data que não possui nenhuma dado armazenado, ou então, digite uma data em formato inválido. Também instruindo ao operador a forma correta de fazê-lo. Na Figura 4.18 é possível visualizar essas situações.

Além disso, a aplicação gera um arquivo no formato .csv onde são armazenados a data, hora, e potência elétrica lidas através da rede industrial. Esse arquivo possui a função de armazenar os dados e gerar o histórico quando solicitado pelo usuário. É possível visualizar uma captura de tela do arquivo exportado pela aplicação na Figura 4.19.

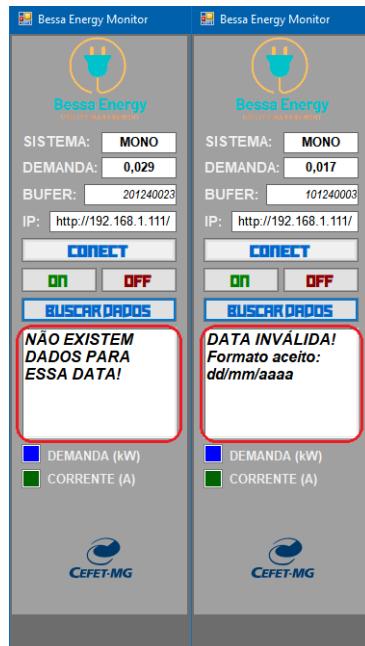


Figura 4.18 – Mensagens de erros para a busca no histórico. Fonte: Elaborado pelo autor.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Data	Hora	Tensao2	Tensao2	Irms1	Irms2	Pot1	Pot2
2	14/06/2022	18,045	124	124	0,09	0	11,16	0
3	14/06/2022	18,0458	124	124	0,08	0	9,92	0
4	14/06/2022	18,0464	124	124	0,07	0	8,68	0
5	14/06/2022	18,0469	124	124	0,07	9,49	8,68	1176,76
6	14/06/2022	18,0475	124	124	8,22	9,49	1019,28	1176,76
7	14/06/2022	18,0481	124	124	8,23	9,49	1020,52	1176,76
8	14/06/2022	18,0486	124	124	8,23	15,86	1020,52	1966,64
9	14/06/2022	18,0492	124	124	8,18	15,86	1014,32	1966,64
10	14/06/2022	18,0497	124	124	8,18	15,84	1014,32	1964,16
11	14/06/2022	18,0503	124	124	8,18	15,86	1014,32	1966,64
12	14/06/2022	18,0508	124	124	8,21	15,86	1018,04	1966,64
13	14/06/2022	18,0514	124	124	8,21	15,83	1018,04	1962,92
14	14/06/2022	18,0519	124	124	8,21	15,84	1018,04	1964,16
15	14/06/2022	18,0525	124	124	8,18	15,84	1014,32	1964,16
16	14/06/2022	18,0531	124	124	8,18	15,83	1014,32	1962,92

Figura 4.19 – Arquivo de armazenamento de dados. Fonte: Elaborado pelo autor.

Capítulo 5

Considerações Finais

Neste capítulo estão expostas as principais observações ao longo do desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso, relacionando os objetivos propostos aos resultados obtidos. Após isso, são apresentadas as propostas de continuidade para o estudo.

5.1 Conclusões

O presente trabalho possuiu como objetivo o desenvolvimento de um sistema de telemetria multiponto não invasivo aplicado na gestão de consumo de energia elétrica em uma unidade industrial. O estudo esteve focado em implementar um sistema de base que exibisse uma visão ampla do perfil energético de uma planta industrial.

Primeiramente, foi realizada uma imersão em busca dos sistemas e das metodologias aplicadas para fins próximos, com o intuito de entender quais são as necessidades do projeto, as orientações normativas a serem seguidas e salientando os benefícios para a sociedade da aplicação do sistema construído. Nesta etapa, os estudos foram direcionados aos métodos desejados para o desenvolvimento do trabalho, tais como uma revisão breve dos protocolos de comunicação industriais e sensores de baixo custo disponíveis no mercado.

Após a finalização da revisão bibliográfica, foram definidas as funcionalidades desejadas para o projeto, além de atributos extras que poderiam ser acrescentados com poucas alterações. Utilizando as informações obtidas, foi escolhido quais *hardwares* seriam empregados para o projeto, de forma que se adequasse as atribuições definidas no escopo.

Foi selecionado o sensor SCT013 para o nível de campo a partir da premissa do sis-

tema ser não invasivo. Esse sensor se mostrou eficaz na obtenção das correntes elétricas de forma não invasiva, não interferindo no ambiente ao seu redor. Porém, devido ao fato do dispositivo possuir como funcionamento um princípio indutivo e aliado a necessidade de realizar diversas amostras para calcular o consumo energético, ele apresentou um atraso significativo para as respostas na rede industrial de comunicação. Seguindo adiante, foi implementado um protocolo do tipo *Devicebus*, construído conforme os moldes do padrão *Modbus*. O protocolo construído mostrou-se eficaz na troca de informações, através da checagem e sincronização da escrita e da leitura entre o mestre e os escravos. A programação desenvolvida permitiu trabalhar com a segurança e a robustez de um protocolo industrial utilizando dispositivos de baixo custo, como microcontroladores Arduino e ESP.

A próxima etapa foi definir a comunicação *Wireless* utilizada. Nesse nível do trabalho foi utilizada uma rede local (LAN). O mestre atua como o *WebServer*, respondendo com as informações de campo quando requisitado. Por se tratar de uma rede Wi-Fi interna, é assegurada a segurança dos dados que transitam por ali, no entanto, existe a limitação de alcance que é determinada pelo roteador utilizado.

Em relação a IHM foram avaliadas diversas plataformas de desenvolvimento, optando-se pela utilização do *Visual Studio Community* para a implementação da interface homem máquina. Inicialmente era previsto a utilização de outro método, porém, essa escolha foi acertada devido ao fato de gerar um executável capaz de operar em qualquer computador *Windows*. Outro ponto, foi que a programação no *Visual Studio Community* permitiu elaborar o código do supervisório com a comunicação *wireless* por parte do *WebClient* em uma mesma aplicação, simplificando a implementação.

Posteriormente, a partir da definição de todos os métodos empregados, o protótipo foi implementado e foram aplicados testes para a sua validação. Foi notado que o funcionamento seguiu o previsto através das simulações e estrutura teórica estudada, principalmente, em relação ao protocolo de comunicação industrial. No entanto, em relação a taxa de amostragem foi necessário reduzir, especialmente, devido à comunicação *Wireless*, pois, ela estava apresentando resíduos de memória mesmo utilizando diversos métodos de checagem do pacote de dados.

Por fim, as atividades documentadas estão alinhadas com o que foi proposto para o trabalho de conclusão de curso. Os objetivos propostos inicialmente foram alcançados, possuindo como o principal resultado um sistema para a gestão de energia elétrica de fácil

implementação e com custo reduzido. Assim, pôde ser verificada a contribuição desse trabalho como um sistema de base para o desenvolvimento de futuros estudos relacionados com a instrumentação e automação industrial, focados nas nuances da energia elétrica.

Dentre as atividades realizadas, podem ser listados os seguintes marcos:

- Revisão sobre telecomunicações, telemetria, comunicação sem fio e conteúdos pertinentes ao projeto;
- Elaboração de um módulo de aquisição de dados para corrente elétrica consumida a partir de um sensor não invasivo SCT013;
- Elaboração de uma rede industrial de comunicação seguindo os moldes do padrão *Modbus*.
- Estruturação da comunicação *wireless*;
- Implementação de uma interface que apresenta ao usuário os dados atuais lidos em campo e o histórico de consumo energético;
- implementação de um arquivo para armazenamento dos dados;

5.2 Propostas de continuidade

Durante o desenvolvimento desse trabalho foram percebidos alguns pontos sugeridos como proposta de continuidade.

- Inserção de um sensor de tensão alternada para maior confiabilidade dos dados;
- Verificação do fator de potência através da análise dos espectros da corrente e tensão alternada;
- Implementação de uma aplicação Web em substituição a aplicação interna;
- Modelagem das cargas usuais em uma indústria e apresentar sua identificação;
- Apresentação dos dados referentes a energia reativa consumida. Apesar de não ser cobrado por esta energia, existem limites do que pode ser consumido por uma indústria;

- Gerar relatórios de horas trabalhadas para cada equipamento, atuando como horímetro para a programação de manutenções;
- Gerar relatório de custos baseado no modelo tarifário empregado;
- Otimizar a comunicação para reduzir o período de amostragem;

5.3 Orçamento

A Tabela 5.1 apresenta os custos previstos para a elaboração deste projeto.

Tabela 5.1 – Orçamento estimado para o desenvolvimento do projeto.

Item	Quantidade	Preço estimado (R\$)
Microcontrolador ESP32	01	R\$ 49,50
Sensores SCT013	03	R\$ 146,10
Arduino Nano	02	R\$ 54,60
Módulo MAX 485	03	R\$ 29,85
Resistores	11	R\$ 2,75
Capacitores	3	R\$ 0,60
Placa de ensaio mini	03	R\$ 16,47
Placa de circuito universal	03	R\$ 20,58
Elementos de Conexão e Insumos	01	R\$ 20,00
Estrutura em MDF 3mm cortada a <i>laser</i>	01	R\$ 23,00
Multímetro de precisão	01	Cedido pelo CEFET (R\$ 1049,00)
Computador	01	Já possuído (R\$ 2500,00)
Total		R\$ 363,45

É importante frisar a colaboração do professor orientador neste trabalho com os itens presentes na Tabela 5.1 , pois ele disponibilizou um sensor SCT013 e os três módulos MAX485 para a construção do protótipo.

Por fim, todos os demais itens apresentados acima foram adquiridos pelo autor para a elaboração deste trabalho.

Referências

- AGUAPURA. **Programa Aguapura.** 2021. Disponível em:
<https://www.aguapuravianet.com.br/web/aguapura/>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- AGUIRRE, L. A. **Fundamentos da Instrumentação.** 1. ed. São Paulo: Pearson, 2014.
- AMORIM, H. Aula 26 - Introdução a CA. In: São José dos Campos, SP: UNIFESP - ICT, 2019.
- ANDERSON, Mondi. **What is RTU?** 2018. Disponível em:
<https://realpars.com/rtu/>. Acesso em: 20 mai. 2021.
- ATMEL. **ATMEGA328 Datasheet.** USA, 2008.
- BERGER, L. T.; INIEWSKI, K. **Redes Elétricas Inteligentes: Aplicações, Comunicação e Segurança.** 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- BORGES, F. **Redes de Comunicação Industrial: Documento técnico nº2.** Portugal, 2007.
- BRANQUINHO, O. C.; REGGIANI, N.; ANDREOLLO, A. G. Redes de comunicação de dados sem fio - Uma análise de desempenho. **PUC Campinas**, Campinas, SP, p. 16, 2005.
- BRASIL, Governo Federal do. **Como analisar gastos com energia elétrica.** 2. ed. Brasil, 2015.
- CEMIG. **Manual de Gerenciamento de Energia.** 1. ed. Belo Horizonte, 2011.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5. ed. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 2013.

DATHEIN, R. Inovação e Revoluções Industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX. **DECON Textos Didáticos**, Porto Alegre, p. 8, 2003.

DIYIOT. **Arduino Nano Tutorial [Pinout]**. 2021. Disponível em:
<<https://diyi0t.com/arduino-nano-tutorial/>>. Acesso em: 21 mai. 2022.

DOMINIAK, A. L. **Projeto de uma bancada didática para o estudo de redes industriais**. 2012. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

ELÉTRICA, MERCADO LIVRE DE ENERGIA. **Mercado Livre de Energia Elétrica**. 2022. Disponível em:

<<https://www.mercadolivredeenergia.com.br/mercado-livre-de-energia/>>. Acesso em: 30 mai. 2022.

ENGINEERS, Last Minute. **Creat A Simple ESP32 Web Server In Arduino IDE**. 2022. Disponível em: <<https://lastminuteengineers.com/creating-esp32-web-server-arduino-ide/>>. Acesso em: 31 mai. 2022.

ENGST, A.; FLEISHMAN, G. **Kit do Iniciante em Redes Sem Fio**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2005.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica**. 2021. Disponível em:
<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/dados-abertos/dados-do-anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 31 mai. 2021.

FERREIRA, A. B. H. **Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Positivo, 2010.

FILHO, G. F. **Automação de Processos e de Sistemas**. 1. ed. São Paulo: Erica|Saraiva, 2014.

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2005.

FILIPEFLOP. **Módulo Conversor RS485 para Arduino**. 2021. Disponível em:
<%3C<https://www.filipeflop.com/produto/modulo-conversor-rs485-para-arduino/>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

- FIRJAN. **Indústria 4.0: Internet das Coisas**. 2016. Disponível em:
<<https://www.firjan.com.br>>. Acesso em: 31 mai. 2021.
- _____. **Quanto custa a energia elétrica?** 2017. Disponível em:
<<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica-1.htm>>. Acesso em: 31 mai. 2021.
- FOSSA, A. J.; SGARDBI, F. A. **Guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001: Gestão de Energia**. Brazil, 2015.
- FOUROZAN, B. A. **Comunicação de dados e Redes de computadores**. 4. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 2007.
- GROOVER, M. P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- ITU. **International Telecommunication Union**. 2021. Disponível em:
<<https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 30 jul. 2021.
- KUGELSTADT, T. **The RS-485 Design Guide**. Dallas, USA, 2021.
- KURNIAWAN, A. **Internet of Things Projects with ESP32**. 1. ed. Mumbai: Packt, 2019.
- LAMB, F. **Automação industrial na prática**. 1. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill Education, 2015. (Tenke).
- LIMA, K. G. **SOFIA - Um simulador de Arduino baseado em Android**. 2018. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- LOZANO-NIETO, A. Telemetry. **CRC Press**, USA, p. 18, 1999.
- LUGLI, A. B. **Redes Industriais : Evolução, Motivação e Funcionamento**, 2011.
- _____. **Redes industriais para automação industrial. AS-I, Profibus e Profinet**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2010.
- LUGLI, A. B.; SANTOS, M. M. D. **Redes Industriais para Automação Industrial: AS-I, PROFIBUS E PROFINET**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- MENEZES, E. B. **Redes Wireless: Uma solução sem fios**. 2009. Universidade Cândido Menezes, Rio de Janeiro.
- MICROSOFT. **Visual Studio**. 2022. Disponível em:
<<https://visualstudio.microsoft.com/pt-br/>>. Acesso em: 20 mai. 2021.

MINAS E ENERGIA, Ministério de. Portaria Interministerial N° 1.877. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 dez. 1985. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main>>. Acesso em: 28 jul. 2021.

MODBUS. **MODBUS Organization**. 2021. Disponível em: <%3C<https://modbus.org/>>. Acesso em: 30 jul. 2021.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

NETO, E. P. F. **Desenvolvimento de sistema baseado na telemetria e integrado ao Aguapura Vianet para monitoramento do consumo e qualidade da energia elétrica**. 2015. UFBA, Salvador.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

OLIVEIRA, H. M. Fragmentos do Desenvolvimento das Telecomunicações: Um mosaico e breves notas históricas. **UFPE**, Recife, PE, p. 11, 2012.

OPEN CIRCUIT. **YwRobot Breadboard Power Supply MB-V2**. USA, 2013.

PLONSKI, G. A.; ALMEIDA, H. S.; CURY, R. B. G. Gestão de Projetos Industriais Baseada em Análise de Custos. **InTech**, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, p. 14, 1991.

PROCEL. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica**. Brasil, 2001.

SAIDEL, M. A.; FAVATO, L. B.; MORALES, C. Indicadores Energéticos e Ambientais: Ferramenta importante na gestão da energia elétrica. **CBEE/ABEE**, São Paulo, SP, p. 6, 2005.

SALES, S. C. P.; TEIXEIRA, N. M. Escolha de tarifas e suas implacações. **FCA/UNESP**, Botucatu, SP, p. 6, 1997.

SAMBIASE, M.; KLEMENT, C.; BARBOSA, C. **Gestão estratégica: Sustentabilidade e desenvolvimento empresarial**. 1. ed. São Paulo: Editora Mackenzie, 2017.

SCHUBERT, B. M. **Protótipo de sistema de captura de dados multiponto wireless para controle de consumo de água**. 2008. FURB, Blumenau.

- SOARES, M. F. Identificação não invasiva de cargas elétricas residenciais utilizando características de regime transitório e permanente. 2021. CEFET, Divinópolis.
- SYSTEMS, Espressif. **ESP32 Series: Datasheet**. China, 2021.
- TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. **Redes de Computadores**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- TEIXEIRA, H. T. **Instrumentação eletroeletrônica**. 1. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017.
- THAI, T. L.; LAM, H. **.NET Framework: Essentials**. 2. ed. U.S.A.: O'Reilly, 2002.
- YHDC. **Split core current transformer**. China, 2014.
- ZIMERMANN, D. **Qual módulo WiFi ESP32 é ideal para meu projeto?** 2020. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/qual-modulo-wifi-esp32-e-ideal-para-meu-projeto/>>. Acesso em: 18 mai. 2021.

Apêndice A

Algoritmos implementados

Os algoritmos desenvolvidos para a rede de comunicação industrial, comunicação *wireless* e o projeto desenvolvido em *Windows Forms* podem ser encontrados na íntegra no seguinte repositório do GitHub: https://github.com/MarllonBessa/TCC_Engenharia_Mecatronica

Apêndice **B**

Vídeo demonstrativo

As funcionalidades do supervisório desenvolvido podem ser visualizadas no seguinte endereço: <https://youtu.be/pcajg5dmyZc>