

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ELVIS ROBERTO DE JESUS AVILA CARVALHO FERNANDES

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA
ELÉTRICA DE REFRIGERADORES

Florianópolis
13 de Abril de 2025

ELVIS ROBERTO DE JESUS AVILA CARVALHO FERNANDES

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA
ELÉTRICA DE REFRIGERADORES

Monografia apresentada ao
Curso Superior de
Engenharia Eletrônica do
Câmpus Florianópolis do
Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção
do diploma de Bacharel em
Engenharia Eletrônica

Orientador: Mauro Tavares
Peraça, Dr. Eng.

Coorientador: Clóvis
Antônio Petry, Dr. Eng.

Florianópolis
13 de Abril de 2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Fernandes, Elvis Roberto de Jesus Avila Carvalho
Desenvolvimento de Sistema de Medição do Consumo de
Energia Elétrica de Refrigeradores / Elvis Roberto de Jesus
Avila Carvalho Fernandes; orientação de Mauro Tavares
Peraça; coorientação de Clóvis Antônio Petry.
- Florianópolis, SC, 2025.

97 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico
de Eletrônica.
Inclui Referências.

1. Medição. 2. Consumo Energético. 3. Refrigeradores.
I. Peraça, Mauro Tavares . II. Petry, Clóvis Antônio
. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Desenvolvimento
de Sistema de Medição do Consumo de Energia
Elétrica de Refrigeradores.

ELVIS ROBERTO DE JESUS AVILA CARVALHO FERNANDES

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA
ELÉTRICA DE REFRIGERADORES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Eletrônica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Florianópolis, 13 de Abril de 2025.

Documento assinado digitalmente



MAURO TAVARES PERACA

Data: 14/04/2025 16:19:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Mauro Tavares Peraça, Dr.

Orientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente



CLOVIS ANTONIO PETRY

Data: 14/04/2025 16:28:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Clóvis Antônio Petry, Dr.

Coorientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente



DANIEL LOHMANN

Data: 14/04/2025 16:57:39-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Daniel Lohmann, Me.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente



ROBINSON PIZZIO

Data: 14/04/2025 16:51:26-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Robinson Pizzio, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Eng. Mauro Tavares Peraça e ao professor Dr. Eng. Clóvis Antônio Petry por sua dedicação, parceria, paciência e sabedoria, que tornaram possível a realização deste trabalho.

À banca examinadora pelo reconhecimento e contribuições.

À minha esposa Ana Carolina Dallpasquale e ao meu filho Lucas Dallpasquale Fernandes que sempre me ajudaram e incentivaram.

Aos meus pais, Altair Carvalho Fernandes e Rosangela Avila Fernandes, à minha irmã Leticia Dolores Fernandes, e à filha da minha esposa por estarem sempre ao meu lado me dando forças e apoio.

Ao meu mestre de Jiu Jitsu Alexandre de Souza, por seus ensinamentos, caráter e amizade.

Aos meus amigos e colegas pela ajuda, diversão, companheirismo e amizade que serão inesquecíveis.

“Você não luta contra uma montanha; você a escala”.
(Alexandre de Souza, 2008)

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e o desenvolvimento de um sistema de medição de energia elétrica aplicado em refrigeradores, utilizando sensores de temperatura, de energia e de abertura de porta conectados a um microcontrolador, com comunicação via USB e *Bluetooth*. Para tanto, foi projetado um protótipo composto por *hardware* e *software*. O *hardware* tem a função de processar e organizar, em uma estrutura de dados, os valores medidos pelos sensores, enquanto que o *software* se conecta ao *hardware* para coletar os dados, fazer o processamento, calcular o consumo e o custo da energia elétrica e emitir alertas de variação de estados de consumo, de temperatura e de abertura de porta. Os testes realizados com o refrigerador evidenciaram que o consumo energético pode variar de acordo com a temperatura interna do refrigerador, com o período de funcionamento do compressor, com o período de processo de degelo e com a frequência da abertura da porta do refrigerador.

Palavras-Chave: Medição. Consumo Energético. Refrigeradores.

ABSTRACT

This thesis presents the study and development of an electrical energy measurement system applied to refrigerators, using temperature, energy and door opening sensors connected to a microcontroller, with communication via USB and Bluetooth. For this purpose, a prototype composed of *hardware* and *software* was designed. The *hardware* has the function of processing and organizing, in a data structure, the values measured by the sensors, while the *software* connects to the *hardware* to collect the data, perform the processing, calculate the consumption and cost of electrical energy and issue alerts of variations in consumption, temperature and door opening states. The tests performed with the refrigerator showed that energy consumption can vary according to the internal temperature of the refrigerator, the period of operation of the compressor, the period of the defrosting process and the frequency of opening of the refrigerator door.

Keywords: Measurement. Energy Consumption. Refrigerators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Corrente alternada (CA).	19
Figura 2 - Polaridades referenciais para potência: (a) absorção de potência; (b) fornecimento de potência.	20
Figura 3 - Esboço de $V_{msen}(\omega at)$: (a) em função de ωat ; (b) em função de t .	22
Figura 4 - Duas senóides em fases distintas.	23
Figura 5 - Representação de um número complexo $z=x+jy=r\angle\phi$.	25
Figura 6 - Triângulo de potência e triângulo de impedância	28
Figura 7 - Triângulo de potência	28
Figura 8 - Wattímetro eletromagnético	29
Figura 9 - Wattímetro eletromagnético conectado à carga	29
Figura 10 - Representação esquemática de refrigerador	31
Figura 11 - Refrigerador real	32
Figura 12 - Representação esquemática de refrigerador	33
Figura 13 - Diagrama esquemático módulo PZEM-004T-100A-V3.0.	40
Figura 14 - Termômetro digital DS18B20.	41
Figura 15 - Módulo Bluetooth HC-05.	42
Figura 16 - Pinagem do microcontrolador Arduino UNO.	43
Figura 17 - Chave Micro Switch KW11-3Z-5 3T.	43
Figura 18 - Diagrama de blocos do circuito.	44
Figura 19 - Esquemático do circuito da PCB.	45
Figura 20 - Placa de circuito impresso.	45
Figura 21 - Pinagem e ligação do sensor de temperatura com a PCB.	46
Figura 22 - Ligação do módulo de energia com a PCB.	47
Figura 23 - Ligação do módulo bluetooth com a PCB.	48
Figura 24 - Pinagem e ligação do sensor de porta com a PCB.	49
Figura 25 - Ligação do gravador de firmware com a PCB.	50
Figura 26 - Ligação do cabo comunicador de dados com a PCB.	51
Figura 27 - Fluxograma do firmware.	52
Figura 28 - Fluxograma do software - Parte 1.	53
Figura 29 - Fluxograma do software - Parte 2.	53
Figura 30 - Fluxograma do software - Parte 3.	54
Figura 31 - Fluxograma do software - Parte 4.	54
Figura 32 - Tela padrão do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores.	55
Figura 33 - Tela padrão do Monitor de Consumo Energético.	56
Figura 34 - Tela padrão de Cadastrar Refrigerador.	56
Figura 35 - Arquivo de Dados Extraídos.	57
Figura 36 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores.	58
Figura 37 - Integração dos componentes.	64
Figura 38 - Porta de comunicação na tela do gerenciador de dispositivos.	65
Figura 39 - (a) Tela de cadastro e testes de refrigeradores; (b) tela com os dados a serem preenchidos e (c) tela com os dados preenchidos.	66

Figura 40 - (a) Arquivo fonte JSON; (b) tela com os dados a serem preenchidos e (c) tela de cadastro e testes de refrigeradores;	67
Figura 41 - Tela de cadastro e testes de refrigeradores;.	68
Figura 42 - Registro de dados do hardware extraídos para o arquivo .txt.	69
Figura 43 - Tela do Monitor de Consumo Energético com os dados sendo processados	70
Figura 44 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores com os dados sendo processados	70
Figura 45 - Tela de aviso de relatório gerado.	71
Figura 46 - Tela de configuração de teste personalizado.	72
Figura 47 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores com os dados configurados referentes ao teste personalizado	73
Figura 48 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores com o teste personalizado em andamento.	74
Figura 49 - Tela de Monitor de Consumo Energético.	76
Figura 50 - Registro de dados extraídos para uma tabela no excel.	77
Figura 51 - Relatório de teste gerado.	78
Figura 52 - Aplicativo serial to bluetooth terminal (a) antes de ser instalado (b) após ser instalado.	79
Figura 53 - Bluetooth no smartphone android (a) antes de ser habilitado (b) após ser habilitado.	80
Figura 54 - Parear hardware com o smartphone (a) antes de ser pareado; (b) dispositivos disponíveis; (c) senha padrão do bluetooth; (d) após ser pareado.	81
Figura 55 - Conexão do aplicativo serial to bluetooth terminal com o hardware (a) aplicativo antes de ser conectado; (b) permitir conexão com o dispositivo; (c) dados sendo recebidos do hardware para o aplicativo.	81
Figura 56 - Setup de Testes	82
Figura 57 - Gráficos das variáveis ao longo do tempo para uma hora de teste sem abrir a porta.	83
Figura 58 - Gráfico da energia acumulada x amostras para uma hora de teste sem abrir a porta.	84
Figura 59 - Tela de Monitor de Consumo Energético para uma hora de teste sem abrir a porta.	84
Figura 60 - Gráficos das variáveis ao longo do tempo para uma hora de teste, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto.	85
Figura 61 - Gráfico da energia acumulada x amostras para uma hora de teste, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto.	86
Figura 62 - Tela de Monitor de Consumo Energético para uma hora de teste, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto.	86
Figura 63 - Gráficos das variáveis ao longo do tempo para uma hora de teste, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos.	87
Figura 64 - Gráfico da energia acumulada x amostras para uma hora de teste, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos.	88
Figura 65 - Tela de Monitor de Consumo Energético para uma hora de teste, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes Climáticas e sua faixa de temperatura.	37
Tabela 2 - Parâmetros do sensor de energia AC PZEM-004T-100A-V3.0.	40
Tabela 3 - Parâmetros do sensor de temperatura DS18B20.	41
Tabela 4 - Parâmetros do módulo bluetooth HC-05.	42
Tabela 5 - Parâmetros do microcontrolador Arduino Uno.	42
Tabela 6 - Pinagem entre os componentes e a PCB.	46
Tabela 7 - Parâmetros a serem editados no software.	59
Tabela 8 - Valores de parâmetros a serem coletados e calculados no software.	60
Tabela 9 - Parâmetros temporais a serem exibidos no software.	60
Tabela 10 - Parâmetros a serem processados no software.	61
Tabela 11 - Botões da tela do analisador.	61
Tabela 12 - Alertas da tela do analisador.	61
Tabela 13 - Parâmetros do refrigerador testado.	66
Tabela 14 - Campos e botões da tela de edição de refrigerador.	67
Tabela 15 - Campos e botões da tela de teste personalizado.	71
Tabela 16 - Parâmetros da tela de consumo energético.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA – Corrente Alternada

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A

FEM – Força Eletromotriz

FP – Fator de Potência

Hz – Hertz

IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment*)

kWh – Quilowatts-Hora

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

PCB – Placa de Circuito Impresso (*Printed Circuit Board*)

RMS – Raiz Média Quadrada (Root Mean Square)

TTL – Lógica Transistor-Transistor (Transistor-Transistor Logic)

USB – (Universal Serial Bus)

VA – Volt-Ampère

Wh – Watt-Hora

LISTA DE SÍMBOLOS

$\frac{d\omega}{dt}$ – Taxa de variação da energia em relação ao tempo ($\frac{J}{s}$)

$\frac{d\omega}{dq}$ – Taxa de variação da energia em relação à carga ($\frac{J}{C}$)

$\frac{dq}{dt}$ – Taxa de variação da carga em relação ao tempo ($\frac{C}{s}$)

f – Frequência (Hz)

i – Corrente elétrica (A)

I_{RMS} – Corrente eficaz (A)

I_m – Valor de pico da corrente (A)

$j - \sqrt{-1}$

p – Potência instantânea (W)

P – Potência média (W)

q – Carga elétrica ©

r – magnitude

S – Potência aparente (VA)

t – tempo (s)

T – Período (s)

v – Tensão (V)

V_{RMS} – Tensão eficaz (V)

x – Parte real

y – Parte imaginária

ω – Energia (J)

V_m – Amplitude da senóide (V)

ω_a – Frequência angular (rad/s)

$\omega_a t$ – argumento da senóide

ϕ – Fase (rad) ou ($^\circ$)

θ_v – Ângulo de fase da tensão elétrica ($^\circ$)

θ_i – Ângulo de fase da corrente elétrica ($^\circ$)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Problema da Pesquisa	17
1.2 Justificativa	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo geral	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
2 DESENVOLVIMENTO	18
2.1 Revisão de literatura	18
2.1 Conceitos	18
2.1.1 Corrente Elétrica	18
2.1.2 Corrente Alternada (CA)	18
2.1.3 Tensão ou Diferença de Potencial	19
2.1.4 Potência	19
2.1.5 Energia	20
2.1.6 Senóide	21
2.1.7 Função periódica	22
2.1.8 Defasagem	23
2.1.9 Fasores	23
2.1.10 Potência Média	25
2.1.11 Valor RMS ou Eficaz	26
2.1.12 Potência Aparente	27
2.1.13 Fator de Potência	27
2.1.14 Potência Complexa	27
2.1.15 Medição de Potência	29
2.1.16 Custo do Consumo de Energia Elétrica	30
2.1.17 Interface SPI	30
2.1.18 Refrigerador	31
2.1.19 Metodologia do Cálculo de Eficiência Energética de Refrigeradores utilizada pelo PBE	36
2.1.20 Tarifas e Taxa de Energia da CELESC	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 Componentes	38
3.1.1 Sensor de Energia	40
3.1.2 Sensor de Temperatura	40
3.1.3 Módulo Bluetooth	41
3.1.4 Microcontrolador	42
3.1.5 Sensor de Porta	43
3.1.6 Placa de Circuito Impresso (PCB)	44
3.2 Circuito e Montagem do Sensor de Temperatura	46
3.3 Circuito e montagem do Sensor de Energia	47
3.4 Circuito e Montagem do Módulo Bluetooth	47
3.5 Circuito e montagem do Sensor de abertura de Porta	48

3.6	Pinagem para Gravação de Firmware	49
3.7	Comunicação de dados via Serial	50
3.8	Firmware	51
3.9	Software	52
3.8	Telas e arquivo de registro padrão do software	55
3.9	Definição dos parâmetros a serem editados no software	57
3.10	Exibição dos dados coletados e calculados no software	59
3.11	Definição dos parâmetros temporais a serem exibidos no software	60
3.12	Definição dos parâmetros dos sensores a serem processados no software	60
3.13	Definição dos botões de software	61
3.14	Definição dos alarmes de software	61
3.15	Coleta de dados	61
3.16	Registro de dados	62
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
4.1	Teste de comunicação de dados entre a PCB e o software em Python	65
4.2	Teste de Cadastro de Refrigerador	66
4.3	Testes de um refrigerador cadastrado	67
4.3.1	Teste de um refrigerador cadastrado	67
4.3.2	Teste personalizado de um refrigerador cadastrado	71
4.3.3	Tela de Monitor de Consumo Energético	74
4.3.4	Registro de dados	77
4.3.5	Relatório gerado	78
4.4	Teste de comunicação de dados da PCB com o Smartphone	79
4.5	Testes do software com refrigerador cadastrado	82
4.5.1	Teste realizado por uma hora, não abrir a porta	83
4.5.2	Teste realizado por uma hora, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto	85
4.5.2	Teste realizado por uma hora, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos	87
4.6	Considerações sobre os testes	89
5	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

O desempenho dos refrigeradores, em termos de consumo energético, pode ser afetado pela temperatura ambiente, temperatura interna do refrigerador, quantidade de aberturas de portas e pelo estado de conservação. A maioria dos refrigeradores não possui um sistema de medição de energia elétrica bem como sua medição de temperatura e a abertura de portas, limitando assim a identificação de desperdícios e a implementação de estratégias de economia de energia. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de medição do consumo de energia elétrica de refrigeradores, utilizando sensores de temperatura, de energia e de abertura de porta conectados a um microcontrolador, com comunicação via USB e *Bluetooth*. Para tanto, foi projetado um protótipo composto de um *hardware* e de um *software*.

O *hardware* terá a função de processar e organizar numa estrutura de dados os seguintes valores medidos pelos sensores: tensão, corrente, potência ativa, fator de potência, frequência, temperatura interna, temperatura ambiente e identificação de abertura de porta. O *software*, por sua vez, terá a função de conectar-se ao *hardware* para coletar a sua estrutura de dados e fazer o processamento e cálculos para estimar o consumo e o custo da energia elétrica e emitir alertas de transição de estados de consumo, de temperatura e de abertura de porta.

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, consiste inicialmente, na realização de uma revisão bibliográfica referente aos conceitos que têm relação com a medição de energia aplicada em refrigeradores, escolher os componentes do *hardware*, implementar o *firmware* do *hardware*, fazer testes unitários e testes de integração, montar o *hardware* na forma de um protótipo e implementar o *software* capazes de coletar, armazenar, e por fim implementar um *script* para gerar os gráficos dos dados coletados ao longo do tempo. Durante os testes são realizados ajustes e calibrações para otimizar a precisão e a eficiência do protótipo, visando validar a proposta bem como sugerir melhorias futuras.

1.1 Problema da Pesquisa

Conhecer o perfil de consumo de energia em refrigeradores poderá evitar desperdício e auxiliar a formular estratégias de economia de energia.

1.2 Justificativa

Em geral, os refrigeradores não possuem um sistema de monitoramento do consumo de energia, dificultando a observação de situações que possam levar ao aumento de consumo. Diante disso, vislumbra-se a possibilidade de implementar um protótipo capaz de medir o consumo de energia, bem como a temperatura interna e externa, além da abertura de porta. A observação dessas variáveis, através do computador ou do *smartphone*, poderá indicar pontos críticos em relação ao consumo de energia nos refrigeradores.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um sistema de medição do consumo de energia elétrica de refrigeradores.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- a) medir o consumo energético do refrigerador;
- b) medir a temperatura interna do refrigerador e a temperatura ambiente;
- c) identificar a abertura de porta;
- d) calcular o consumo e o seu custo ao longo do tempo;
- e) gerar gráficos dos parâmetros coletados;
- f) enviar os dados do consumo energético e da temperatura para um aplicativo de celular;
- g) desenvolver um *software* que receba os dados de medição, configure parâmetros e faça alertas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de literatura

Neste capítulo, serão discutidos os conceitos que têm relação com a medição de energia aplicada em refrigeradores: corrente elétrica, corrente alternada, tensão ou diferença de potencial, potência, energia, senóide, função periódica, defasagem fasores, potência média, valor RMS ou eficaz, potência aparente, fator de potência, potência complexa, medição de potência e o custo do consumo de energia elétrica.

Além dos conceitos citados a interface SPI será discutida porque é a interface de comunicação utilizada entre o *hardware*, os periféricos e o *software*, bem como os conceitos de refrigeradores, a metodologia do cálculo de eficiência energética de refrigeradores utilizada pelo PBE e as tarifas e taxas de energia da CELESC.

2.1 Conceitos

2.1.1 Corrente Elétrica

Sadiku e Alexander (2003) definem que “a corrente elétrica é o fluxo de carga por unidade de tempo” (p. 6). A equação corrente elétrica é definida pela Equação 1:

$$i \triangleq \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

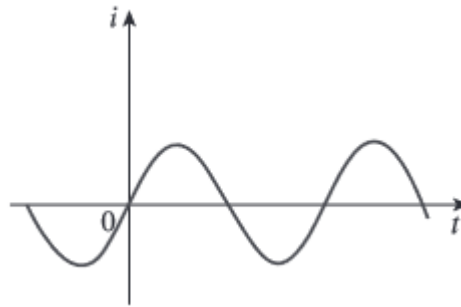
Em que:

- a) i é a corrente elétrica em ampères (A);
- b) q é a carga em coulombs (C);
- c) t é o tempo em segundos (s).

2.1.2 Corrente Alternada (CA)

Sadiku e Alexander (2003) definem que “corrente alternada (CA) é uma corrente que varia com o tempo segundo uma forma de onda senoidal e é esse tipo de corrente utilizada em residências para ligar refrigeradores e outros eletrodomésticos” (p. 7). A corrente alternada pode ser vista na Figura 1:

Figura 1 - Corrente alternada (CA).



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.7).

2.1.3 Tensão ou Diferença de Potencial

Sadiku e Alexander (2003) definem que “tensão (ou diferença de potencial) é a energia necessária para deslocar uma carga unitária através de um elemento, ou seja, é um trabalho realizado por uma força eletromotriz (FEM)” (p. 8). A tensão entre dois pontos pode ser definida pela Equação 2:

$$v_{ab} = v \triangleq \frac{d\omega}{dq} \quad (2)$$

Em que:

- a) v_{ab} ou v é a tensão em volts (V);
- b) ω é a energia em joules (J);
- c) q é a carga em coulombs(C).

2.1.4 Potência

Sadiku e Alexander (2003) definem que “potência é a velocidade com que se consome (potência com sinal negativo (-)) ou se absorve (potência com sinal positivo (+)) energia medida em watts (W)” (p. 10). A Figura 2 mostra a convenção do sinal passivo de acordo com as polaridades referenciais para potência. A equação da potência é definida pela Equação 3, enquanto que a equação da potência instantânea é definida pela Equação 4:

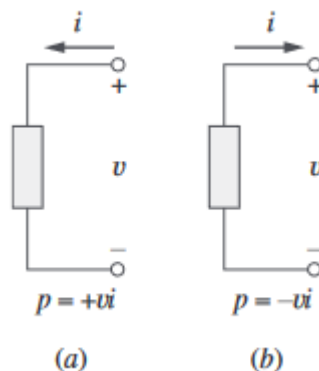
$$p \triangleq \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} = \frac{dq}{dt} = \pm v \cdot i \quad (4)$$

Em que:

- a) p é a potência ou potência instantânea em watts (W);
- b) ω é a energia em joules (J);
- c) t é o tempo em segundos (s);
- d) q é a carga em coulombs(C);
- e) v é a tensão em volts (V);
- f) i é a corrente elétrica em ampères (A).

Figura 2 - Polaridades referenciais para potência: (a) absorção de potência; (b) fornecimento de potência.



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.10).

2.1.5 Energia

Sadiku e Alexander (2003) definem que “energia é a capacidade de realizar trabalho. As concessionárias de energia elétrica medem a energia em watts-hora (1 Wh = 3600 J)” (p. 11).

Segundo Sadiku e Alexander (2003) “o custo da eletricidade cobrada por uma concessionária de energia depende da quantidade de energia consumida em quilowatts-hora (kWh), além de uma tarifa mínima relacionada à manutenção do cliente à rede de energia elétrica e à medida que o consumo aumenta, o custo por

kWh diminui.” (p. 17). Portanto, o custo médio depende da tarifa mensal básica, do custo mensal e do consumo, como pode ser visto na Equação 5.

$$\text{Custo médio} = \frac{\text{Tarifa} + \text{Custo Mensal}}{\text{Consumo}} \quad (5)$$

Em que:

- a) *Custo médio* é o valor total a ser pago em centavos por kWh;
- b) *Custo mensal* é o valor mensal em centavos por cada kWh;
- c) *Consumo* é valor de consumo em kWh.

2.1.6 Senóide

Sadiku e Alexander (2003) definem que “senóide é um sinal que possui a forma da função seno ou cosseno, ou seja, a mesma inverte-se em intervalos de tempo regulares e possui, alternadamente, valores positivos e negativos e quando são acionados por fontes de tensão ou de corrente senoidais são chamados circuitos CA” (p. 330).

Como pode ser visto na Equação 6, uma senóide é definida por:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega_a t) \quad (6)$$

Em que:

- a) V_m é a amplitude da senóide;
- b) ω_a é a frequência angular em radianos por segundo (rad/s);
- c) $\omega_a t$ é o argumento da senóide.

A Figura 3a mostra a senóide em função do seu argumento, enquanto que a Figura 3b mostra a senóide em função do tempo. Como a senóide se repete a cada T segundos, tem-se que o *período* T de uma função periódica é o tempo de um ciclo completo ou o número de segundos por ciclo, definido pela Equação 7, enquanto que a frequência é o número de ciclos por segundo como pode ser visto na Equação 8:

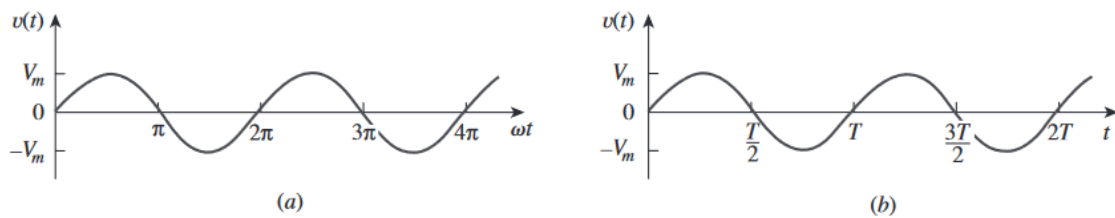
$$T = \frac{2\pi}{\omega_a} \quad (7)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (8)$$

Em que:

- a) T é o período em segundos (s);
- b) ω_a é a frequência angular em radianos por segundo (rad/s);
- c) f é a frequência cíclica da senóide em hertz (Hz).

Figura 3 - Esboço de $V_m \text{sen}(\omega_a t)$: (a) em função de $\omega_a t$; (b) em função de t .



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.331).

2.1.7 Função periódica

Sadiku e Alexander (2003) definem que “função periódica é aquela que satisfaz $f(t) = f(t + nT)$, para todo t e para todos os inteiros n ” (p. 332).

Substituindo t por $t + T$ na Equação 6, faz com que $v(t)$ seja repetido por T segundos, como pode ser demonstrado na Equação 9:

$$\begin{aligned}
 v(t) &= V_m \text{sen}(\omega_a t) \\
 v(t + T) &= V_m \text{sen} \omega_a (t + T) = V_m \text{sen} \omega_a \left(t + \frac{2\pi}{\omega_a} \right) \\
 v(t + T) &= V_m \text{sen}(\omega_a t + 2\pi) = V_m \text{sen}(\omega_a t) = v(t) \\
 v(t + T) &= v(t)
 \end{aligned} \quad (9)$$

2.1.8 Defasagem

A Equação 10 define uma expressão genérica para a senóide (Sadiku e Alexander, 2003, p.333):

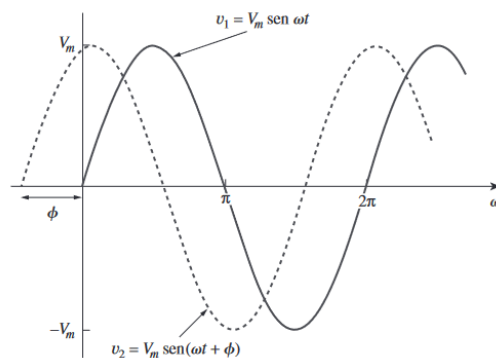
$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega_a t + \phi) \quad (10)$$

Em que:

- a) $\omega_a t + \phi$ é o argumento em radianos ou graus;
- b) ϕ é a fase em radianos ou graus

A defasagem é ilustrada na Figura 4. A senóide v_2 está avançada em relação a senóide v_1 em ϕ , ou que a senóide v_1 está atrasada em relação a senóide v_2 em ϕ . Se o valor de $\phi = 0$ e as formas de onda operam na mesma frequência, então as duas senóides estão em fase e atingem seus valores máximos e mínimos exatamente ao mesmo tempo, independente do valor da amplitude (Sadiku e Alexander, 2003, p.333).

Figura 4 - Duas senóides em fases distintas.



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.331).

2.1.9 Fasores

Sadiku e Alexander (2003) definem que “fasor é um número complexo que representa a amplitude e a fase de uma senóide” (p. 335). A Equação 11 mostra como pode ser escrito um número complexo na forma retangular. A Equação 12

mostra a representação de um número complexo na forma polar ou exponencial:

$$z = x + jy \quad (11)$$

$$z = r\angle\phi \quad (12)$$

Em que:

- a) x é a parte real de z ;
- b) y é a parte imaginária de z ;
- c) j tem o valor de $\sqrt{-1}$;
- d) r é a magnitude de z ;
- e) ϕ é a fase de z .

A Figura 5 mostra a relação entre a forma retangular e a forma polar onde o eixo x representa a parte real e o eixo y , a parte imaginária de um número complexo. Portanto a magnitude r é definida pela Equação 13 enquanto que a fase ϕ é definida pela Equação 14 (Sadiku e Alexander,2003, p.336):

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (13)$$

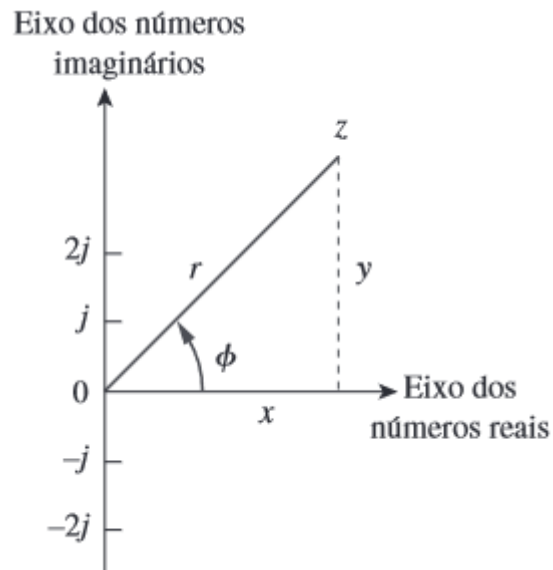
$$\phi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (14)$$

A parte real x é definida pela Equação 15, enquanto que a parte imaginária é definida pela Equação 16 (Sadiku e Alexander,2003, p.336):

$$x = r * \cos\phi \quad (15)$$

$$y = r * \sin\phi \quad (16)$$

Figura 5 - Representação de um número complexo $z = x + jy = r\angle\phi$.



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.336).

Como pode ser visto na Equação 17, a representação de fasor se baseia na identidade de Euler (Sadiku e Alexander, 2003, p.337):

$$e^{\pm j\phi} = \cos\phi \pm j\sin\phi \quad (17)$$

2.1.10 Potência Média

A potência média, é a média da potência instantânea ao longo de um período” (p.407) como mostra a Equação 18 (Sadiku e Alexander, 2003, p.337):

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (18)$$

Em que:

- a) P é a potência média em watts (W);
- b) V_m é valor de pico da tensão em volts (V);
- c) I_m é valor de pico da corrente em amperes (A);
- d) θ_v é o ângulo de fase da tensão elétrica em graus ($^\circ$);

e) θ_i é o ângulo de fase da corrente elétrica em graus ($^\circ$).

Quando $\theta_v = \theta_i$ a tensão e a corrente estão em fase, então o circuito é puramente resistivo. Quando $\theta_v - \theta_i = \pm 90^\circ$ o circuito é puramente reativo, portanto uma carga resistiva (resistor) sempre absorve potência, enquanto uma carga reativa (capacitor ou indutor) não absorve nenhuma potência média (Sadiku e Alexander, 2003, p.408).

2.1.11 Valor RMS ou Eficaz

O valor RMS ou eficaz mede a eficácia de uma fonte de tensão ou de corrente na liberação de potência para uma carga resistiva e é dado pela Equação 19 (Sadiku e Alexander, 2003, p.414):

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (19)$$

Considerando apenas sinais senoidais, a tensão eficaz e a corrente eficaz são dadas respectivamente pela Equação 20 e pela Equação 21 (Sadiku e Alexander, 2003, p.415):

$$V_{RMS} = V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

$$I_{RMS} = I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

Na indústria do setor de energia elétrica, os voltímetros e os amperímetros especificam as magnitudes em termos de seus valores RMS e não em termos de seus valores de pico. Em análise de potência é conveniente expressar tensão e corrente em seus valores RMS (Sadiku e Alexander, 2003, p.416).

2.1.12 Potência Aparente

A potência aparente é o produto dos valores RMS da tensão e da corrente e é dada pela Equação 22 (Sadiku e Alexander,2003, p.417):

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (22)$$

Em que:

- a) S é a potência aparente medida em volt-ampères (VA);
- b) V_{RMS} é a tensão eficaz medida em volts (V);
- c) I_{RMS} é a corrente eficaz medida em ampères (A).

2.1.13 Fator de Potência

O fator de potência é o cosseno da diferença de fase entre tensão e corrente e é dado pela Equação 23 (Sadiku e Alexander,2003, p.417):

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (23)$$

Se $FP = 1$, a corrente e a tensão estão em fase e a carga é puramente resistiva. Se $FP = 0$, a corrente e a tensão estão defasadas e a carga é puramente reativa. Para uma carga capacitiva o FP está adiantado, logo a corrente está adiantada em relação à tensão. Para uma carga indutiva o FP está atrasado, logo a corrente está atrasada em relação à tensão (Sadiku e Alexander,2003, p.418).

2.1.14 Potência Complexa

A potência complexa (em VA) é o produto do fasor de tensão RMS e o conjugado complexo do fasor de corrente RMS. Por ser um número complexo, sua parte real é a potência real P e sua parte imaginária é a potência reativa Q .

Portanto, a potência complexa, a potência aparente, a potência real, e a potência reativa são mostradas na Equação 24, na Equação 25, na Equação 26 e na

Equação 27, respectivamente. A Figura 6 e a Figura 7 representam esses parâmetros (Sadiku e Alexander, 2003, p.421):

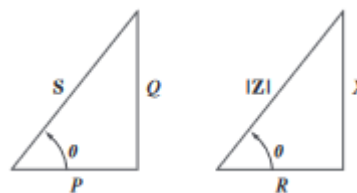
$$S = P + jQ = V_{RMS}(I_{RMS})^* = |V_{RMS}| |I_{RMS}| \angle \theta_v - \theta_i \quad (24)$$

$$S = |S| = |V_{RMS}| |I_{RMS}| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (25)$$

$$P = \text{Re}(S) = S \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (26)$$

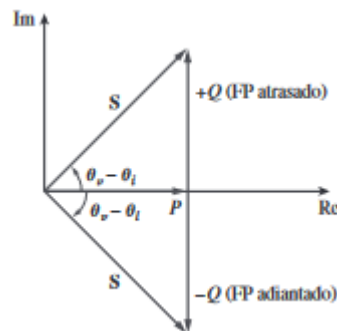
$$Q = \text{Im}(S) = S \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (27)$$

Figura 6 - Triângulo de potência e triângulo de impedância



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.421).

Figura 7 - Triângulo de potência



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.421).

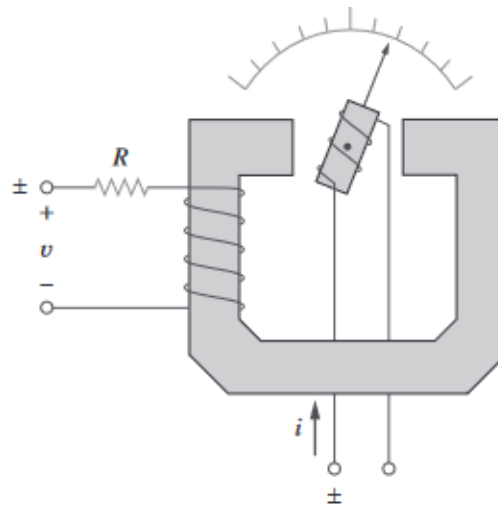
A forma mais comum de energia elétrica utilizada é a corrente alternada (CA), tal que permitiu a transmissão de energia em alta tensão da fonte geradora até o consumidor (Sadiku e Alexander, 2003, p.406). Vale salientar que a Equação 24, a Equação 25, a Equação 26 e a Equação 27 são válidas apenas para sinais senoidais puros.

2.1.15 Medição de Potência

Wattímetro é o instrumento para medir a potência média e é formado por uma bobina de corrente (impedância muito baixa conectada em série com a carga) e uma bobina de tensão (impedância muito alta conectada em paralelo com a carga).

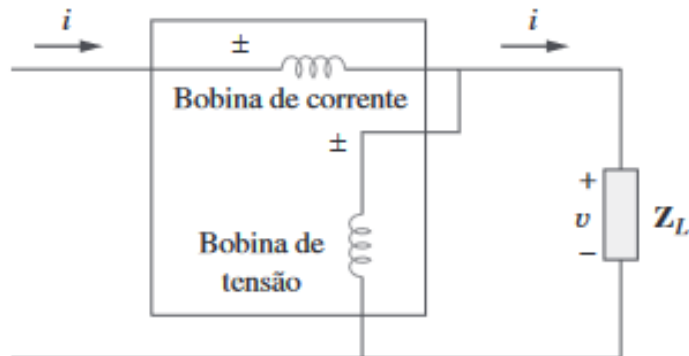
Quando as duas bobinas são energizadas, a inércia mecânica do sistema móvel produz um ângulo de deflexão que é proporcional ao valor médio do produto $v(t)i(t)$ (Sadiku e Alexander, 2003, p.428). A Figura 8 mostra o wattímetro do tipo eletromagnético enquanto que a Figura 9 mostra o mesmo conectado à carga.

Figura 8 - Wattímetro eletromagnético



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.429).

Figura 9 - Wattímetro eletromagnético conectado à carga



Fonte: (Sadiku e Alexander, 2003, p.429).

2.1.16 Custo do Consumo de Energia Elétrica

Cargas com fatores de potência baixos custam caro para manter, porque exigem correntes elevadas. Uma carga com potência reativa diferente de zero significa que a energia flui nos dois sentidos entre a carga e a fonte, gerando novas perdas de potência (Sadiku e Alexander, 2003, p.428).

As concessionárias de energia elétrica dividem seus clientes em baixa, média e alta potências, porque possuem estruturas de tarifação diferentes para cada categoria. A quantidade de energia consumida é medida usando um medidor de kilowatt-hora instalado nas dependências do cliente (Sadiku e Alexander, 2003, p.428). Portanto o custo do consumo de energia elétrica é dado pela Equação 28:

$$\text{Custo Total} = \text{Custo Fixo} + \text{Custo da Energia} \quad (28)$$

Em que:

- a) *Custo Total* é o valor total a ser pago;
- b) *Custo Fixo* é o custo de geração, transmissão e distribuição de eletricidade para atender às necessidades de carga dos consumidores dado em KW ou KVA ;
- c) *Custo da Energia* é valor de consumo dado em kWh.

2.1.17 Interface SPI

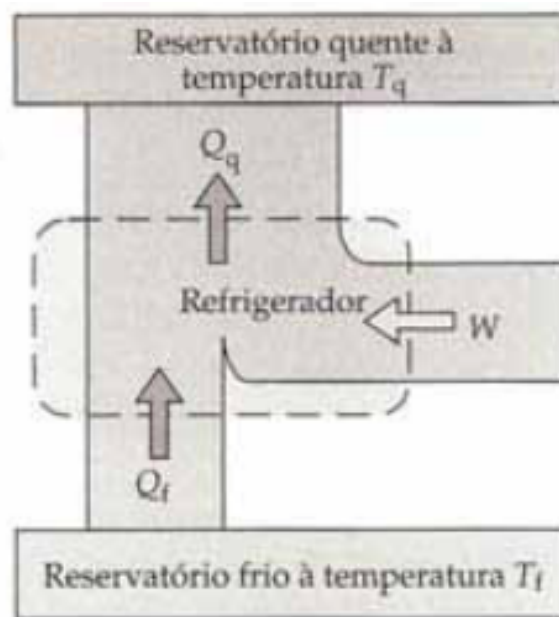
O protocolo SPI (Serial Peripheral Interface - Interface Serial de Periféricos) é um sistema simples e eficiente de comunicação serial destinado ao interfaceamento de dispositivos programáveis como microprocessadores e microcontroladores, em que o dispositivo mestre desloca a informação a ser transmitida através da sua linha MOSI (Master Out Slave In - Saída Mestre, Entrada Escravo) que é conectada à linha MOSI do dispositivo escravo e, ao mesmo tempo, os dados previamente presentes no registrador de deslocamento do dispositivo escravo são deslocados pela sua linha MISO (Master In Slave Out - Entrada Mestre, Saída Escravo), que é conectada à linha MISO do dispositivo mestre. O sinal de *clock* do dispositivo mestre sincroniza a comunicação, e no final da transmissão o dado presente no registrador de deslocamento do mestre é encontrado no registrador do dispositivo escravo enquanto que o dado previamente presente no registrador do dispositivo escravo é

encontrado no registrador do dispositivo mestre (Pereira, 2007, p.261).

2.1.18 Refrigerador

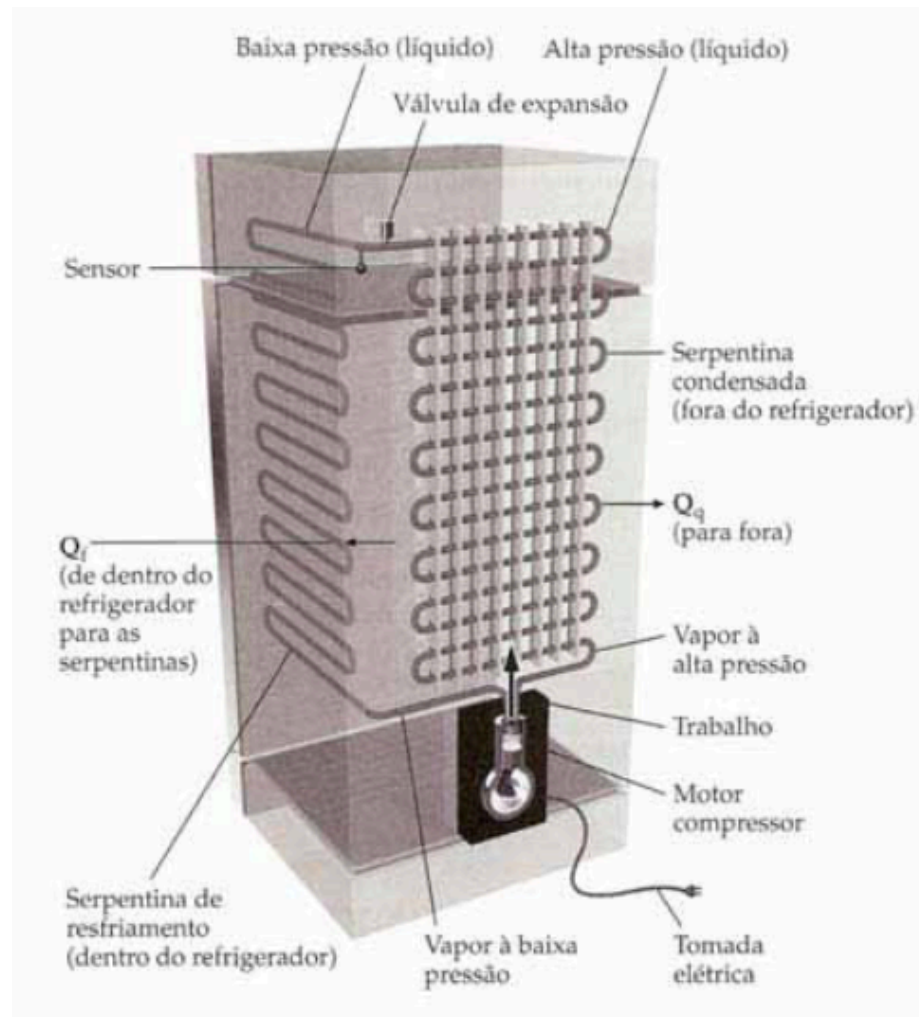
Um refrigerador é uma máquina térmica que transfere calor do reservatório frio e o libera para o ambiente (reservatório quente), sendo necessário a realização de trabalho. O enunciado da segunda lei da termodinâmica diz que é impossível para um refrigerador, operando em um ciclo, produzir como único efeito o de retirar calor de um corpo frio e liberar a mesma quantidade de calor para um corpo quente (Tipler e Mosca, 2009, p.640). A Figura 10 mostra a representação esquemática de um refrigerador, enquanto que a Figura 11 mostra um refrigerador real.

Figura 10 - Representação esquemática de refrigerador



Fonte: (Tipler e Mosca, 2009, p.641).

Figura 11 - Refrigerador real



Fonte: (Tipler e Mosca, 2009, p.641).

O coeficiente de desempenho do refrigerador é dado na Equação 29:

$$CD = \frac{Q_f}{W} \quad (\text{Equação 29})$$

Em que:

- a) CD é a medida do coeficiente de desempenho do refrigerador;
- b) Q_f é o calor retirado do reservatório de baixa temperatura em joules (J);
- c) W é o trabalho realizado sobre o refrigerador em watts (W).

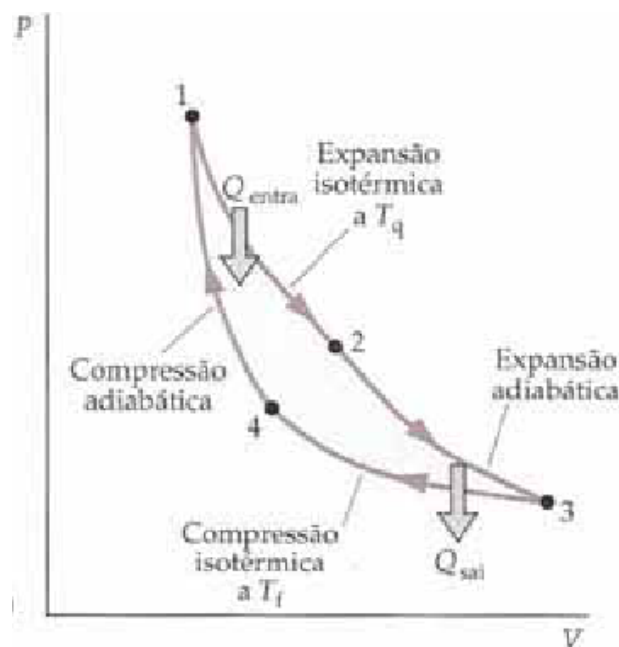
Para que um processo seja reversível é necessário que (Tipler e Mosca, 2009, p.644):

- a) Nenhuma energia mecânica é transformada em energia térmica interna pelo atrito, por forças viscosas ou por outras forças dissipadoras;
- b) A energia é transferida na forma de calor apenas entre corpos com uma diferença infinitesimal de temperatura;
- c) O processo deve ser quase-estático para que o sistema esteja sempre em (ou infinitesimalmente próximo de) um estado de equilíbrio.

O ciclo de Carnot é reversível entre dois reservatórios térmicos e consiste em quatro etapas (Figura 12) (Tipler e Mosca, 2009, p.644):

- a) Uma absorção quase-estática e isotérmica de calor de um reservatório quente;
- b) Uma expansão quase-estática e adiabática para uma temperatura menor;
- c) Uma liberação quase-estática e isotérmica de calor para um reservatório frio;
- d) Uma compressão quase-estática e adiabática de volta ao estado original.

Figura 12 - Representação esquemática de refrigerador



Fonte: (Tipler e Mosca, 2009, p.645).

O rendimento de uma máquina de Carnot é dado pela Equação 30 (Tipler e Mosca, 2009, p.645):

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (\text{Equação 30})$$

Em que:

- a) ε_c é o rendimento de uma máquina de Carnot em percentagem (%);
- b) T_f é a temperatura do reservatório frio em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou Fahrenheit (K);
- c) T_q é a temperatura do reservatório quente em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou Fahrenheit (K).

O trabalho realizado por uma máquina de Carnot é a maior quantidade de trabalho que poderia ser realizado e é dado pela Equação 31 (Tipler e Mosca, 2009, p.645):

$$W_{m\acute{a}x} = \varepsilon_c Q_q \quad (\text{Equação 31})$$

Em que:

- a) $W_{m\acute{a}x}$ é o trabalho realizado por uma máquina de Carnot em joules (J);
- b) ε_c é o rendimento de uma máquina de Carnot em percentagem (%);
- c) Q_q é o calor retirado do reservatório de alta temperatura em joules (J).

Para uma máquina real, a perda de trabalho é a maior quantidade trabalho que poderia ser realizado menos o trabalho realmente realizado e é dado pela Equação 32 (Tipler e Mosca, 2009, p.645):

$$W_{perdido} = W_{m\acute{a}x} - W \quad (\text{Equação 32})$$

Em que:

- a) $W_{perdido}$ é a perda de trabalho em joules (J);
- b) $W_{m\acute{a}x}$ é a maior quantidade de trabalho que poderia ser realizado, é o trabalho realizado por uma máquina de Carnot em joules (J);
- c) W é o trabalho realmente realizado em joules (J).

Os principais componentes que compõem um refrigerador doméstico são: o

gabinete, o líquido refrigerante, o compressor hermético, o evaporador, o acumulador, a linha de sucção, o condensador, o tubo capilar, o filtro secador e o controle de temperatura do refrigerador (Carmeis,2002, p.23).

O refrigerador possui em seu interior, um compartimento para alimentos congelados, um compartimento para alimentos frescos e, em alguns casos um compartimento para acondicionamento de legumes, verduras e frutas (Carmeis,2002, p.23).

O gabinete possui vários volumes, tal que forma e sustenta o refrigerador. A cuja profundidade e a largura do gabinete são praticamente uniformes (com exceção dos refrigeradores slims), enquanto que a altura varia com o volume do refrigerador (Carmeis,2002, p.23).

O líquido refrigerante é o fluido que condensa durante a rejeição de calor (temperatura ambiente), e evapora durante a retirada de calor (temperatura interna). Portanto, o valor da entalpia de vaporização deve ser alto para que ocorra mais trocas de calor nas mudanças de estado (Carmeis,2002, p.23).

O compressor hermético é um dispositivo acionado por um motor elétrico que tem a função de retirar e comprimir o refrigerante (vaporizado) do evaporador em um volume pequeno a uma alta temperatura (Carmeis,2002, p.28). Os tipos de compressores em uso são os recíprocos (mais comuns em refrigeradores domésticos), os giratórios, os tipos parafuso e os centrífugos (Carmeis,2002, p.29).

O evaporador separa o compartimento dos alimentos congelados do compartimento dos alimentos frescos. Quando ocorre a evaporação do líquido refrigerante, ocorre a refrigeração, ou seja, a absorção de calor demandado pelo gabinete. As correntes de convecção fazem com que o ar mais frio desça enquanto que o ar mais quente sobe, assim o calor é retirado do refrigerador e, o refrigerante líquido ao entrar no evaporador devido às pressões baixas evapora e absorve o calor, tal que se move para a linha de sucção. (Carmeis,2002, p.24).

O acumulador é um dispositivo de segurança que fica localizado na parte superior do evaporador e que impede a passagem do refrigerante líquido para a linha de sucção e para o compressor, além de fornecer alguma refrigeração (Carmeis,2002, p.24).

A linha de sucção tem a função de conduzir o líquido refrigerante vaporizado do evaporador ao compressor, funcionando como um trocador de calor e evitando danos ao compressor, de tal forma que não sejam formadas bolhas de vapor no

mesmo (Carmeis,2002, p.25).

O condensador move as moléculas do líquido refrigerante do lado baixa pressão para o lado de alta pressão. As moléculas de vapor do refrigerante são empurradas pelo pistão do compressor ao lado de alta pressão, fazendo com que a temperatura aumente até que fique mais elevada do que a temperatura média do condensador (Carmeis,2002, p.26).

O filtro secador retém a umidade, a sujeira, os metais e as partículas estranhas, para que não se misturem com o líquido refrigerante, evitando congelamento e formação de lama ácida que corroi as unidades herméticas devido à umidade (Carmeis,2002, p.27).

O tubo capilar é uma válvula de expansão que faz a dosagem exata de líquido refrigerante para cada parte do sistema, controlando a vazão ao evaporador de modo que o gás saia parcialmente superaquecido, pois, o compressor deve bombear apenas gás, evitando líquido no compressor (Carmeis,2002, p.27).

O controle de temperatura do refrigerador é feito por um termostato de modo que o compressor seja ligado e desligado a fim de manter a temperatura do mesmo em uma determinada faixa. O termostato é disposto sobre o evaporador para garantir a baixa temperatura interna do refrigerador (VENDRUSCULO,2003, p.5).

2.1.19 Metodologia do Cálculo de Eficiência Energética de Refrigeradores utilizada pelo PBE

A norma IEC 62552:2007 define “aparelho de refrigeração é um gabinete isolado com um ou mais compartimentos e de volume e equipamentos adequados para uso doméstico, refrigerado por convecção natural ou um sistema sem gelo, pelo qual o resfriamento é obtido por um ou mais meios que o consomem” (p. 8).

A norma IEC 62552:2007 classifica “os aparelhos de refrigeração em quatro classes climáticas ou em uma variedade de classes, cuja faixa de temperaturas ambientes nas quais os aparelhos devem ser usados e para as quais as temperaturas de armazenamento exigidas devem ser atendidas conforme especificado na Tabela 1” (p. 16).

A norma IEC 62552:2007 define que “se a temperatura mais baixa declarada não estiver dentro das classes climáticas padrão, a temperatura ambiente mais baixa é a temperatura onde o aparelho pode ser usado, cumprindo os requisitos do

teste de armazenamento. Esta temperatura deve ser indicada no manual do usuário e no relatório de teste” (p. 17). A Tabela 1 mostra as classes climáticas e sua faixa de temperatura.

Tabela 1 - Classes Climáticas e sua faixa de temperatura.

Classe	Símbolo	Faixa de temperatura ambiente
Temperado estendido	SN	10 °C a 32 °C
Temperado	N	16 °C a 32 °C
Subtropical	ST	16 °C a 38 °C
Tropical	T	16 °C a 43 °C

Fonte: (Dados retirados da norma IEC 62552:2007 p.16).

A norma IEC 62552:2007 define que “o teste de consumo de energia tem o objetivo de medir o consumo de energia de aparelhos de refrigeração sob condições de teste específicas. O teste de consumo de energia no caso de compartimentos de uso múltiplo é realizado na temperatura alvo do tipo de compartimento mais frio declarado pelo fabricante” (p. 47). As tabelas de eficiência energética de refrigeradores, frigobares, combinados e combinados frost free são compostas do modelo, tipo de produto, sistema de degelo, agente de expansão da espuma, número de registro, volume interno, **consumo de energia (kWh/mês)**, **índice de eficiência** e faixa de classificação (INMETRO, 2023).

2.1.20 Tarifas e Taxa de Energia da CELESC

A tarifa de energia elétrica envolve custos com geração, transmissão e distribuição de energia, encargos, valor de mercado da distribuidora para obter a tarifa a ser cobrada dos consumidores além da incidência do PIS, COFINS E ICMS (CELESC, 2005). As tarifas da CELESC são reajustadas anualmente no mês de agosto de cada ano, de modo que tal reajuste ainda varia de acordo com cada modalidade tarifária (CELESC, 2005). A fórmula para tarifa com tributos em R\$ é dada pela Equação 33 enquanto que a fórmula para bandeira tarifária com tributos em R\$ é dada pela Equação 34 (CELESC, 2005).

$$Tarifa_{final} = \frac{Tarifa_{homologada}}{\left(\frac{100 - Aliquota_{PIS} - Aliquota_{COFINS}}{100}\right) \left(\frac{100 - Aliquota_{ICMS}}{100}\right)} \quad (\text{Equação 33})$$

$$Bandeira = \frac{Valor_{bandeira\ atual}}{\left(\frac{100 - Aliquota_{PIS} - Aliquota_{COFINS}}{100}\right) \left(\frac{100 - Aliquota_{ICMS}}{100}\right)} \quad (\text{Equação 34})$$

3 METODOLOGIA

No primeiro momento foi feita uma revisão bibliográfica com objetivo de analisar de forma teórica os parâmetros e diretrizes referentes ao projeto. Após a revisão, foram escolhidos os componentes a serem aplicados, definindo assim as características do projeto a ser desenvolvido.

Com os componentes escolhidos, foi realizada a montagem dos mesmos, foi gravado o *firmware* e realizados os testes unitários e os testes de integração a fim de validar os objetivos específicos do projeto utilizando o Arduino UNO.

Com a validação dos objetivos específicos, houve a integralização dos componentes em uma placa de circuito impresso (PCB) a fim de construir um protótipo.

Após a construção do protótipo foram realizados novamente os testes de unidade e testes de integração a fim de validar os objetivos específicos do projeto utilizando a placa de circuito impresso (PCB).

Nesta seção serão apresentados o esquemático da placa de circuito impresso, o diagrama de blocos do *hardware*, os esquemas de ligação e as pinagens dos circuitos, o fluxograma de funcionamento do *firmware*, o fluxograma de funcionamento do *software*, o fluxograma de funcionamento do *script* de geração de gráficos das variáveis, as telas de *software* e seus componentes bem como a coleta de dados e o registro de dados.

Após a etapa de validação foi elaborado o relatório documentado final.

3.1 Componentes

A aquisição da medição de tensão CA, de corrente CA, de potência ativa, de frequência, de fator de potência e de energia ativa foi realizada utilizando o módulo de comunicação AC PZEM-004T-100A-V3.0, que é um módulo que tem a capacidade de atender a essas medições com alta precisão (0,5 % e para fator de potência 1 %), possui uma ampla faixa de medição (80 V até 260 V para tensão e até 100 A para corrente), tornando-o adequado para monitorar o consumo energético de refrigeradores, além de utilizar comunicação via interface TTL o que facilitou a comunicação com o Arduino e com a PCB.

A aquisição da medição de temperatura foi realizada utilizando o sensor de

temperatura DS18B20, que é um sensor que tem a capacidade de fazer leituras com uma alta precisão ($\pm 0,5$ °C entre -10 °C e +85 °C) e possui uma ampla faixa de medição (-55 °C a +125 °C), além de ser ideal para ambiente úmidos tornando-o adequado para monitorar a temperatura interna de refrigeradores.

O processamento das aquisições das medições foi feito pela placa de desenvolvimento que contém o microcontrolador ATMEGA328P, que é um chip que tem compatibilidade com os sensores utilizados, possui interface de comunicação serial utilizada para fazer a aquisição e o envio dos dados, além de ter um baixo consumo energético e operar com um oscilador de 16 MHz o que permitiu trabalhar com tempos de respostas adequados para fazer a aquisição e o processamento dos dados.

O sensor de porta utilizado foi uma Chave Micro Switch KW11-3Z-5 3T, que é uma chave de abertura de porta e possui uma alta durabilidade para acionamentos repetitivos mecânicos.

A gravação de *firmware*, a alimentação e a comunicação de dados com o computador do microcontrolador Arduino UNO foram feitas utilizando um cabo USB 2.0 A/B, que é um cabo multifuncional.

A programação do *firmware* foi feita via ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) versão 2.3.3, que é uma IDE de suporte nativo que forneceu a ferramenta de depuração e facilitou a escrita e a correção do código do *firmware*.

A gravação de *firmware* na PCB foi feita utilizando um gravador USBASP, que é um gravador de baixo custo adequado para gravar os dados diretamente no chip ATMEGA328P, possui compatibilidade com Windows e Linux e que permite a escrita e a leitura na memória EEPROM do chip.

A programação do *software* foi feita pela linguagem de programação Python versão 3.12.5, que é uma linguagem que permitiu visualizar e manipular os dados processados via comunicação serial do chip ATMEGA328P, gerar relatórios e por funcionar em *Windows* e *Linux* permite a portabilidade do código do *software*.

A alimentação da placa de desenvolvimento foi feita por uma fonte 9V/2A, cuja tensão de entrada foi regulada para 5V (para alimentar o *chip*, o sensor de energia, os sensores de temperatura, o sensor de porta e o gravador de *firmware*).

A comunicação da PCB com o *software* foi feita utilizando o cabo conversor USB TTL PL2303HX, que é um cabo de interface USB-Serial de baixo custo e alto desempenho que permitiu fazer a comunicação assíncrona *full-duplex* com o

computador via USB porque o seu *driver* emula uma porta de comunicação no sistema operacional.

A comunicação da PCB com o *smartphone* foi feita por um módulo de comunicação bluetooth HC-05, o que permitiu a mobilidade e o monitoramento de dados remoto até aproximadamente 10 metros de distância

3.1.1 Sensor de Energia

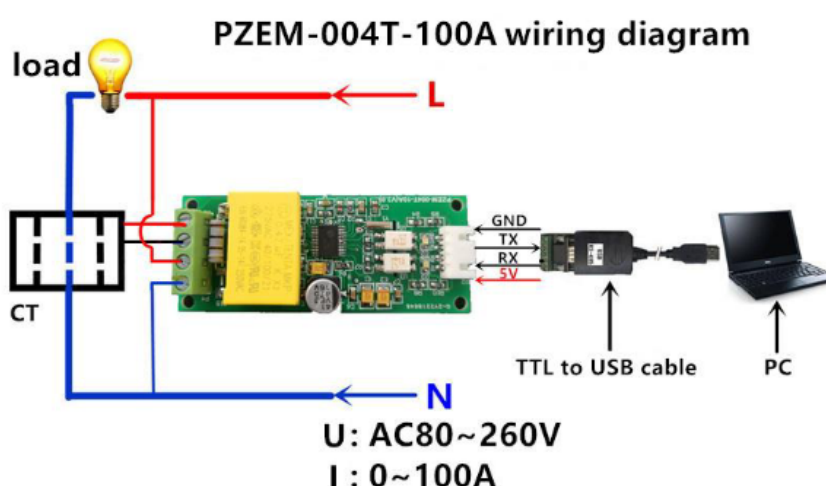
O módulo de comunicação CA PZEM-004T-100A-V3.0 é principalmente usado para medição de tensão CA, de corrente CA, de potência ativa, de frequência, de fator de potência e de energia ativa. Os dados desse módulo são lidos através da interface TTL (PZEM-004T V3.0 User Manual, p.1), os parâmetros dele são mostrados na Tabela 2 e a Figura 13 mostra o diagrama esquemático de comunicação do mesmo com o computador.

Tabela 2 - Parâmetros do sensor de energia AC PZEM-004T-100A-V3.0.

Parâmetro	Faixa de Medição	Resolução	Precisão de medição
Tensão CA	80 até 260 VCA	0,1 V	0,5 %
Corrente CA	0,02 até 10 A	0,001 A	0,5 %
Potência Ativa	0,4 até 23 kW	0,1 W	0,5 %
Fator de Potência	0,00 até 1,00	0,01	1 %
Frequência	45 Hz a 60 Hz	0,1 Hz	0,5 %
Energia ativa	0 até 9999,99 kWh	1 Wh	0,5 %

Fonte: (Dados retirados do datasheet PZEM-004T-V3.0).

Figura 13 - Diagrama esquemático módulo PZEM-004T-100A-V3.0.



Fonte: Datasheet PZEM-004T-V3.0.

3.1.2 Sensor de Temperatura

O termômetro digital DS18B20 é um sensor de temperatura à prova d' água,

cuja medição pode ser feita a longa distância do microcontrolador e é indicado para ambientes úmidos. Os parâmetros dele são mostrados na Tabela 3, a Figura 14 mostra o sensor.

Tabela 3 - Parâmetros do sensor de temperatura DS18B20.

Características	Descrição
Interface 1-Wire	Requer apenas um pino para comunicação.
Multidrop	Suporta múltiplos sensores no mesmo barramento.
Alimentação	3,0 V a 5,5 V (pode ser alimentado pela linha de dados).
Faixa de Temperatura	-55 °C a +125 °C (-67 °F a 257 °F).
Precisão	±0,5 °C entre -10 °C e +85 °C.
Resolução	Programável de 9 a 12 bits.
Conversão Máxima	750 ms (para 12 bits).
Configuração de Alarmes	Ajustes não-voláteis com busca por dispositivos fora da faixa.
Aplicações	Controle térmico, sistemas industriais e produtos de consumo.

Fonte: Datasheet DS18B20.

Figura 14 - Termômetro digital DS18B20.



Fonte: Robocore (2025).

3.1.3 Módulo Bluetooth

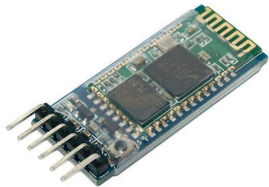
O módulo Bluetooth HC-05 Master/Slave é um dispositivo sem fio utilizado para comunicação entre microcontroladores e dispositivos móveis. Os parâmetros dele são mostrados na Tabela 4 e a Figura 15 mostra o módulo.

Tabela 4 - Parâmetros do módulo bluetooth HC-05.

Características	Descrição
Chip	BC352239A
Alimentação	3,6 V a 6 V DC
Tensão de Operação	3,3 V a 5 V
Bluetooth Versão	V3.0 + EDR
Cobertura de Sinal	Até 10 metros
Frequência	2,4 GHz (Banda ISM)
Modos de Operação	Mestre e Escravo
Interface de Comunicação	UART (9600 bps por padrão)
Aplicações	Automação, IoT, comunicação sem fio

Fonte: Datasheet HC-05.

Figura 15 - Módulo Bluetooth HC-05.



Fonte: Eletrodex (2025).

3.1.4 Microcontrolador

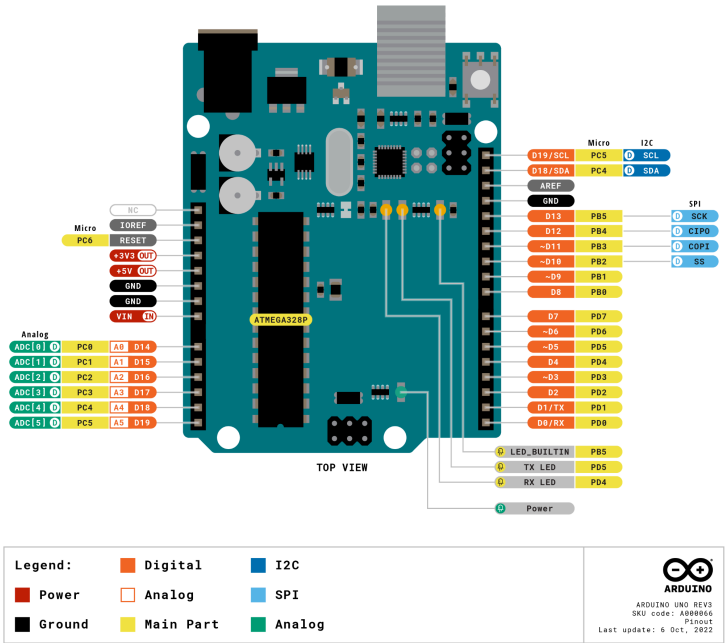
O Arduino UNO é uma placa de desenvolvimento baseada no *chip ATmega328P*. Os parâmetros dele são mostrados na Tabela 5 enquanto que a Figura 16 mostra o microcontrolador e a pinagem dele.

Tabela 5 - Parâmetros do microcontrolador Arduino Uno.

Especificação	Descrição
Microcontrolador	ATmega328P
Tensão de Operação	5 V
Tensão de Entrada (recomendada)	7 V - 12 V
Tensão de Entrada (limite)	6 V - 20 V
Pinos Digitais I/O	14 (6 com PWM)
Pinos PWM	6
Entradas Analógicas	6
Corrente por Pino I/O	20 mA
Corrente do Pino 3.3V	50 mA
Memória Flash	32 KB (0,5 KB usados pelo bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade do Clock	16 MH
LED Integrado	Pino 13
Dimensões	68,6 mm × 53,4 mm
Peso	25 g

Fonte: Arduino Store (2024).

Figura 16 - Pinagem do microcontrolador Arduino UNO.

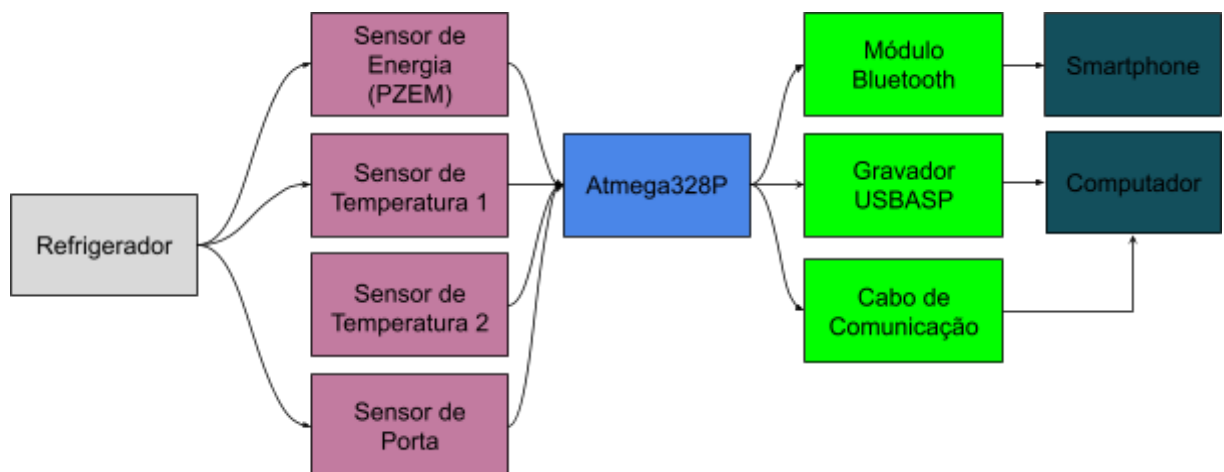


3.1.6 Placa de Circuito Impresso (PCB)

A placa de circuito impresso (PCB) foi utilizada para integrar os reguladores de tensão, o *chip ATmega328P*, os conectores do sensor de energia, dos sensores de temperatura, do sensor de abertura de porta, do módulo *bluetooth*, do gravador de *firmware*, do cabo de comunicação. Além disso, ela foi projetada para atender outras funcionalidades como comunicação com módulo relé, comunicação I2C, comunicação com módulo ethernet, gravador FTDI, comunicação com motor e com pinos ADC tais que não foram utilizadas nesse projeto. A Figura 18 mostra o diagrama de blocos do circuito e a Figura 19 mostra o esquemático da PCB utilizado nesse projeto.

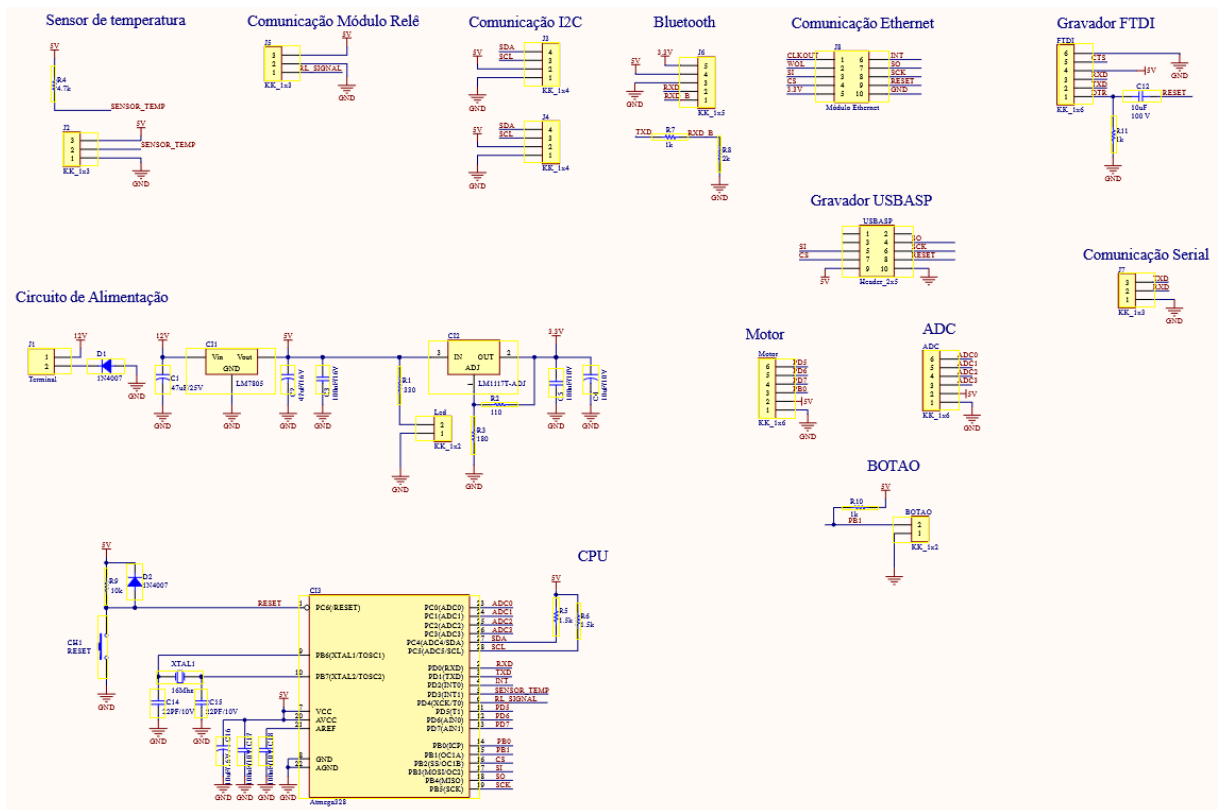
A Figura 20 mostra a placa de circuito impresso denominada Board v1.0. A pinagem entre os componentes e a PCB é mostrada na Tabela 6.

Figura 18 - Diagrama de blocos do circuito.



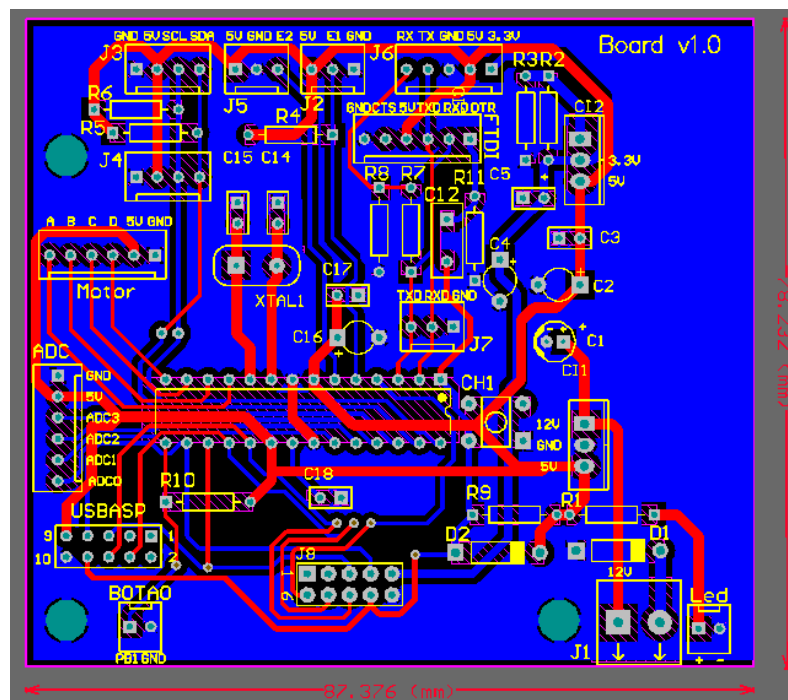
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 19 - Esquemático do circuito da PCB.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 20 - Placa de circuito impresso.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 6 - Pinagem entre os componentes e a PCB.

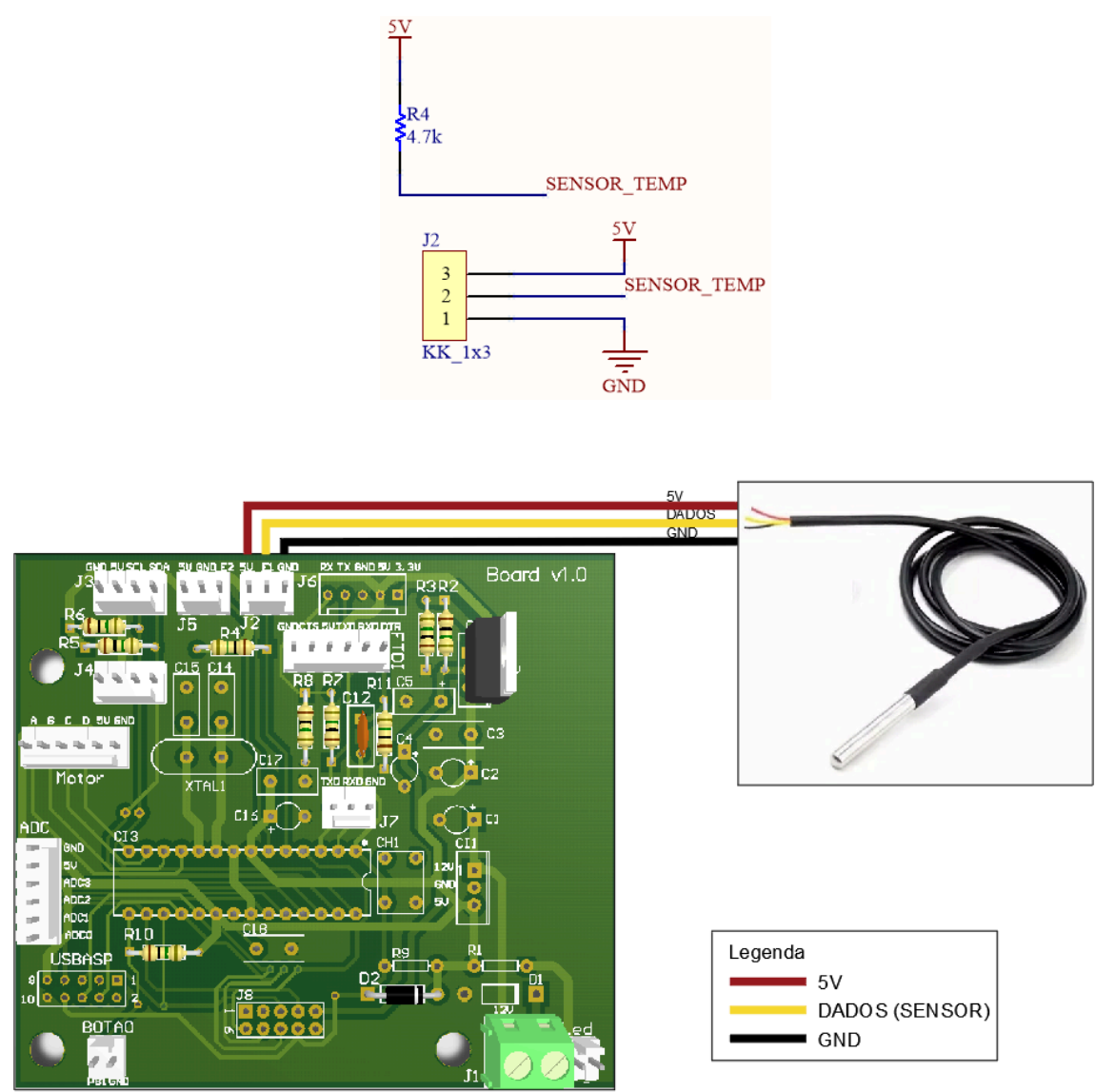
Componente	Conectores da PCB
Sensor de Temperatura	J2
Sensor de Energia	J8
Módulo <i>Bluetooth</i>	J6
Gravador de <i>Firmware</i>	USBASP
Sensor de Porta	BOTAO
Cabo de Comunicação Serial	J7
Fonte de Alimentação	J1

Fonte: Elaboração própria.

3.2 Circuito e Montagem do Sensor de Temperatura

A Figura 21 mostra a pinagem do circuito de aquisição da medição de temperatura utilizando o sensor de temperatura e a ligação do mesmo com a PCB.

Figura 21 - Pinagem e ligação do sensor de temperatura com a PCB.

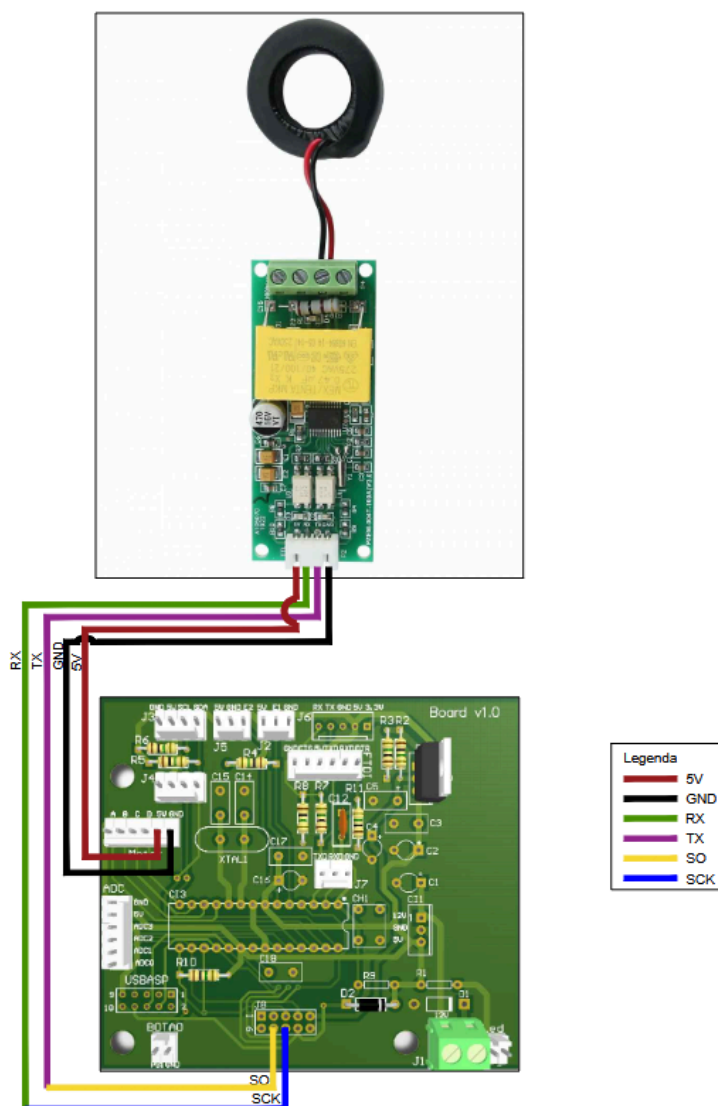


Fonte: Elaboração própria (2025).

3.3 Circuito e montagem do Sensor de Energia

A Figura 22 mostra a ligação do módulo de energia com a PCB.

Figura 22 - Ligação do módulo de energia com a PCB.

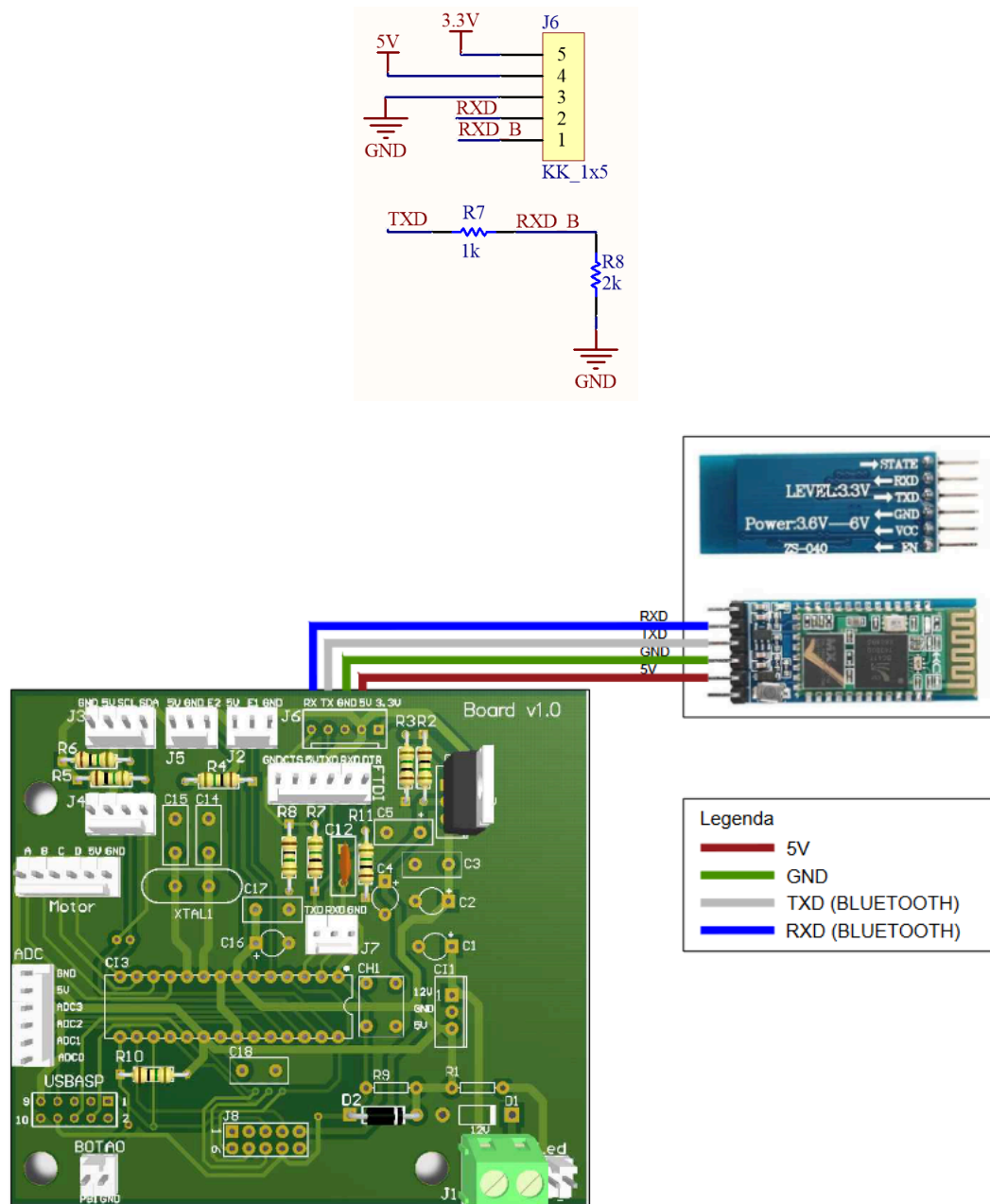


Fonte: Elaboração própria (2025).

3.4 Circuito e Montagem do Módulo Bluetooth

A Figura 23 mostra a pinagem do circuito *bluetooth* e a ligação do mesmo com a PCB.

Figura 23 - Ligação do módulo bluetooth com a PCB.

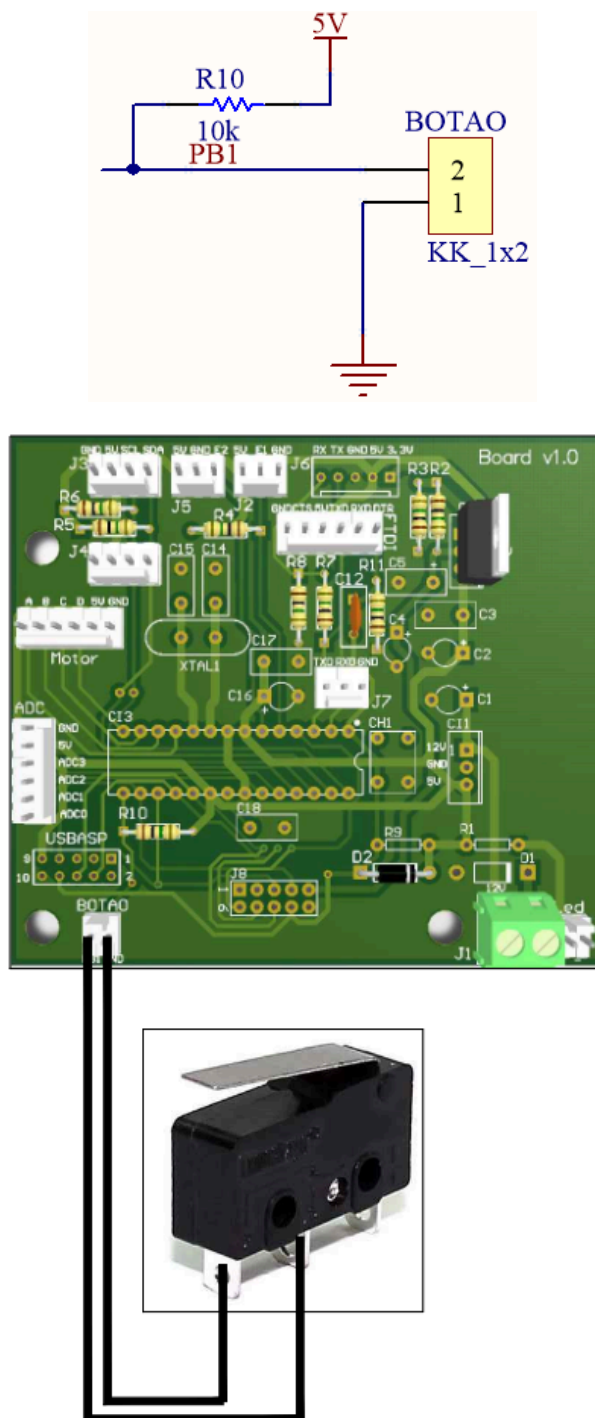


Fonte: Elaboração própria (2025).

3.5 Circuito e montagem do Sensor de abertura de Porta

A Figura 24 mostra a pinagem do circuito de sensor de abertura de porta a ligação do mesmo com a PCB.

Figura 24 - Pinagem e ligação do sensor de porta com a PCB.

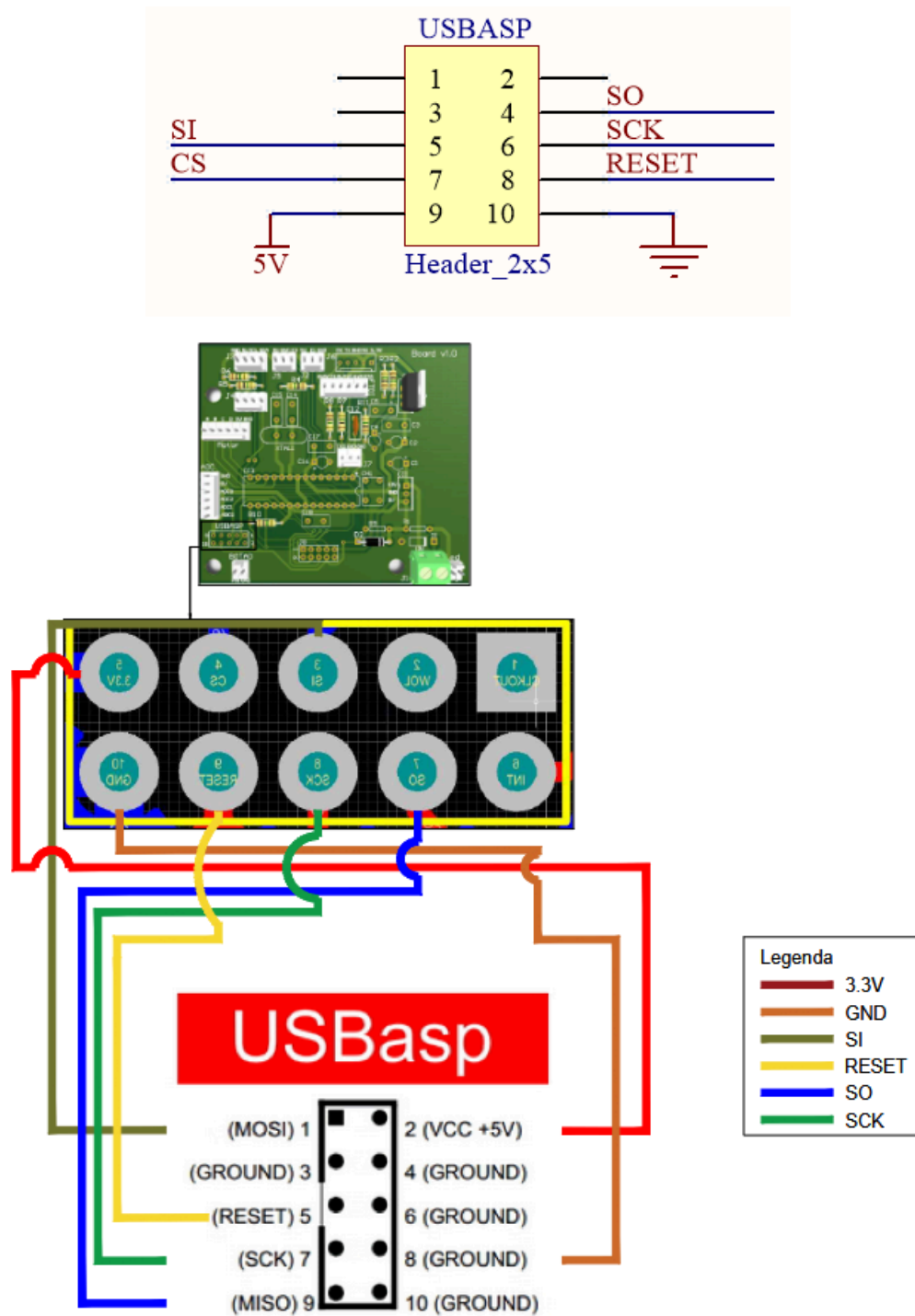


Fonte: Elaboração própria (2025).

3.6 Pinagem para Gravação de Firmware

A Figura 25 mostra a pinagem do gravador de *firmware* e a ligação do mesmo com a PCB.

Figura 25 - Ligação do gravador de firmware com a PCB.

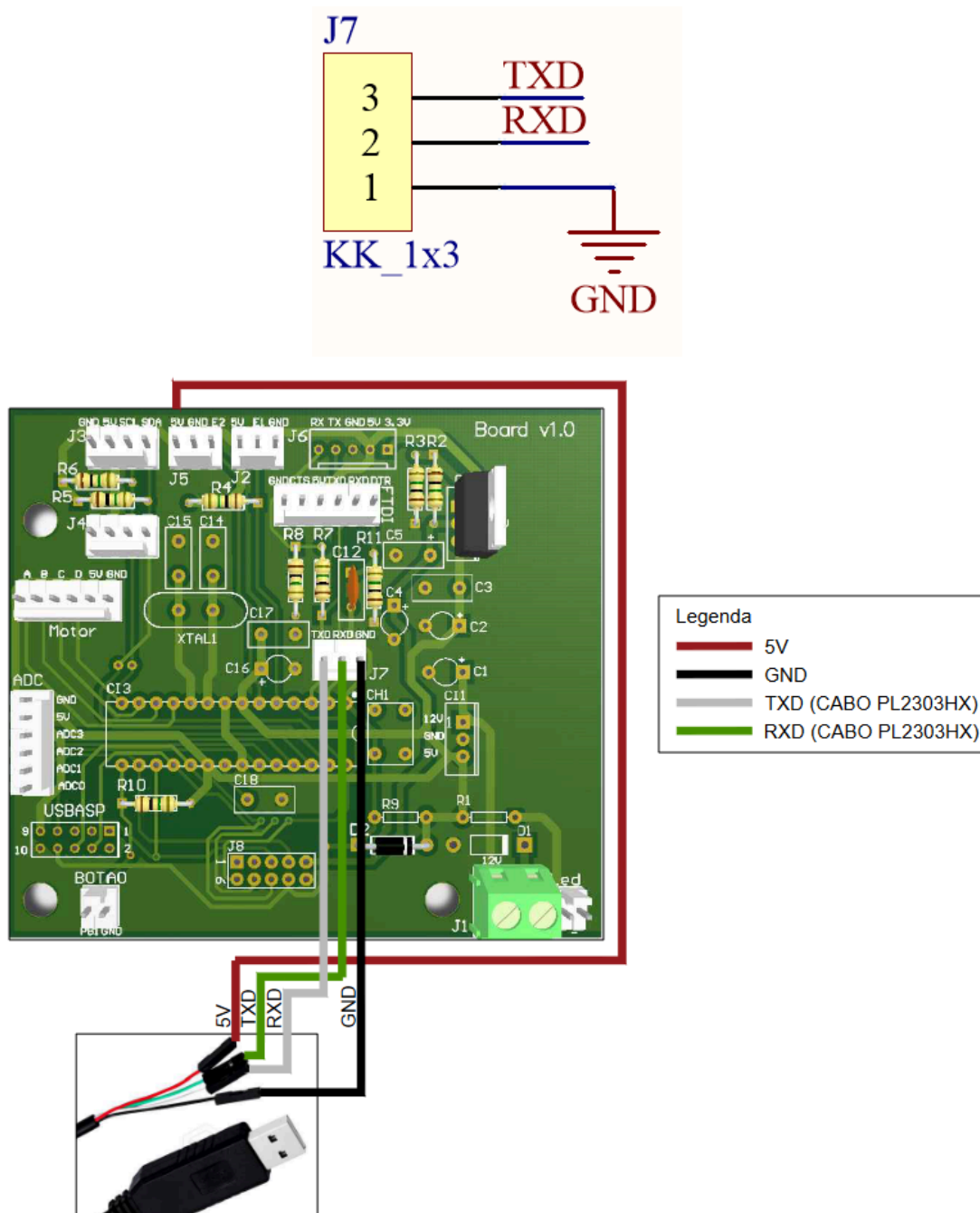


Fonte: Elaboração própria (2025).

3.7 Comunicação de dados via Serial

A Figura 26 mostra a pinagem do cabo comunicador de dados e a ligação do mesmo com a PCB.

Figura 26 - Ligação do cabo comunicador de dados com a PCB.

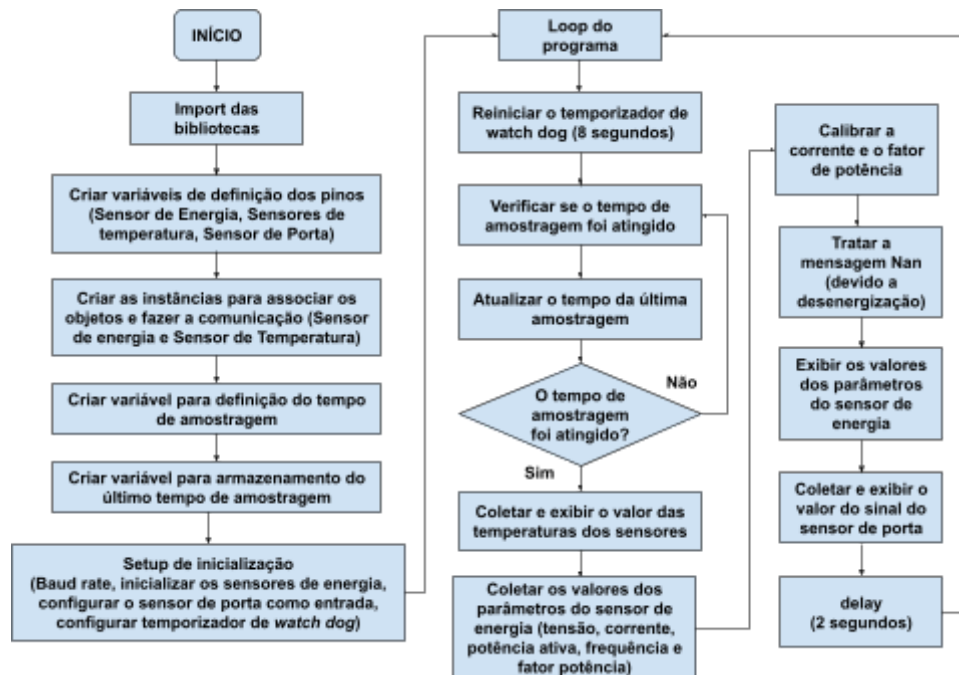


Fonte: Elaboração própria (2025).

3.8 Firmware

A Figura 27 mostra o fluxograma de representação do *firmware* utilizado.

Figura 27 - Fluxograma do *firmware*.

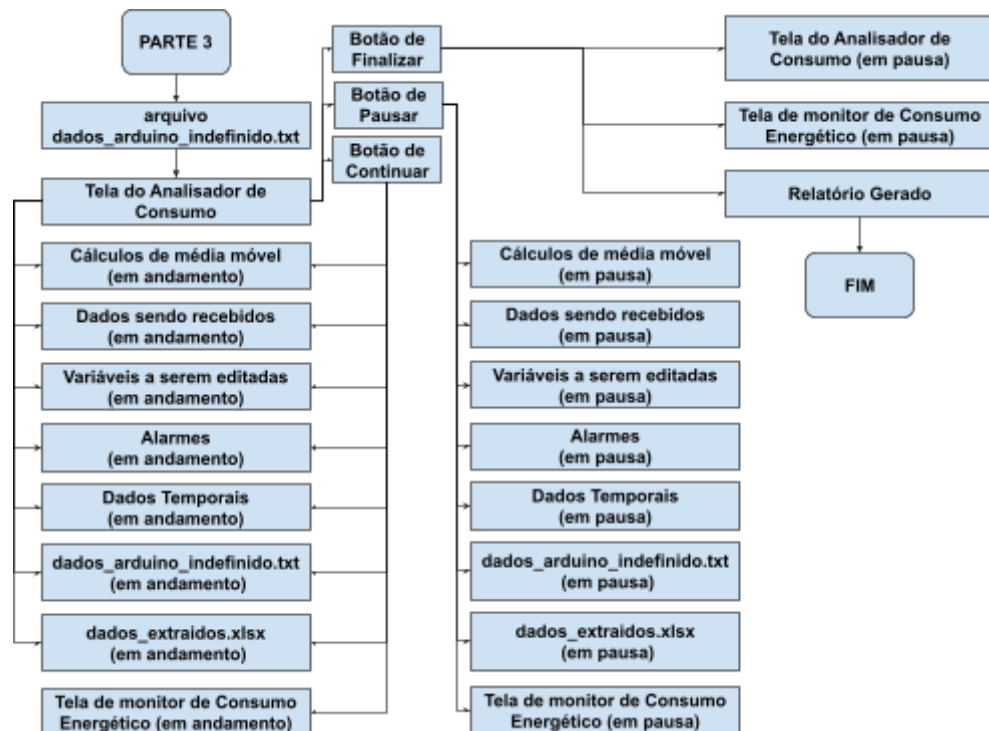


Fonte: Elaboração própria (2025).

3.9 Software

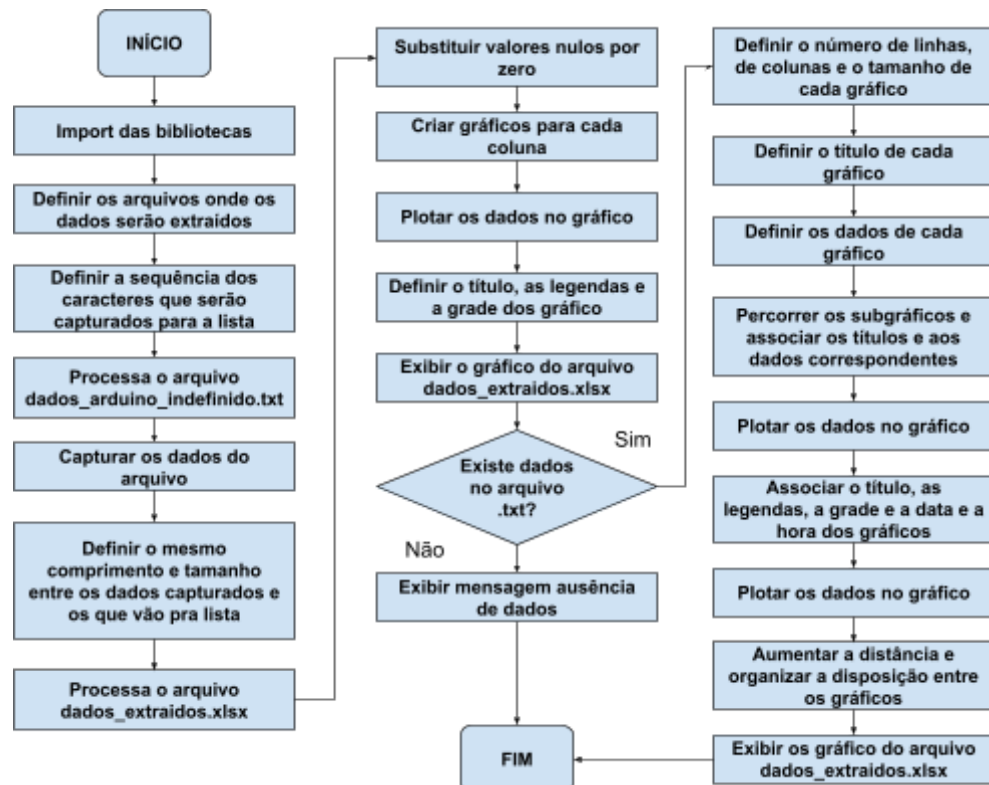
O *software* foi dividido em fluxogramas que possuem quatro partes. A primeira parte demonstra como deve ser feita a comunicação do *hardware* com o *software* bem como a inicialização do *software* como é mostrado na Figura 28. A segunda parte demonstra como deve ser feito o processo de cadastro, edição e exclusão de refrigeradores, bem como a inicialização de testes como é mostrado na Figura 29. A terceira parte demonstra o funcionamento das telas que compõem o *software* como é mostrado na Figura 30. A quarta parte é separada das três anteriores e é um *script* em *Python* que demonstra como foram gerados os gráficos como mostra a Figura 31.

Figura 30 - Fluxograma do software - Parte 3.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 31 - Fluxograma do software - Parte 4.



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.8 Telas e arquivo de registro padrão do software

Quando o *hardware* se conecta com o *software* as telas padrão de teste e o arquivo de dados que são abertas simultaneamente são:

- Tela do Analisador de Consumo Energético (Figura 32);
- Tela de Monitor de Consumo Energético (Figura 33);
- Tela de Cadastro de Refrigeradores (Figura 34);
- Arquivo dados_extraídos.xlsx (Figura 35).

Figura 32 - Tela padrão do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores.

Analísador de Consumo Energético de Refrigeradores

Item testado: N/A

Atualizar Variáveis

Tempo Decorrido: 0:00:00 | Iniciado em:

Média Temperatura: N/A

Média Temperatura2: N/A

Média Tensão: N/A

Média Corrente: N/A

Média Potência: N/A

Média Potência Aparente: N/A

Média Potência Reativa: N/A

Consumo Mensal Estimado: N/A

Diferença Absoluta do Consumo: N/A

Porcentagem Relativa do Consumo: N/A

Custo Mensal Estimado: N/A

Energia Consumida: N/A

Custo Total da Energia: N/A

Tarifa Energia (R\$/kWh): 0.8

Potência Nominal (W): 218.0

Tensão Nominal (V): 220.0

Consumo Mensal Nominal (kWh): 55.3

Limite Inferior do Consumo Mensal Nominal(kWh): 52.0

Limite Superior do Consumo Mensal Nominal (kWh): 57.0

Limite Inferior Sensor Temperatura 1 (°C): 25.0

Limite Superior Sensor Temperatura 1 (°C): 27.0

Limite Inferior Sensor Temperatura 2 (°C): 25.0

Limite Superior Sensor Temperatura 2 (°C): 27.0

Pausado em: N/A

Continuado em: N/A

Finalizado em: N/A

Dia Programado: N/A

Horário de Início: N/A

Horário de Fim: N/A

Tempo Restante: N/A

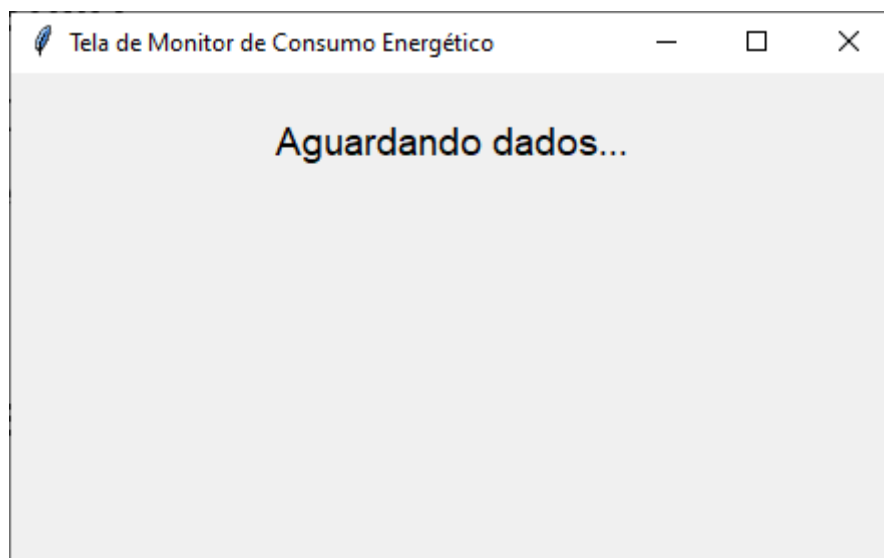
Continuar Teste

Pausar Teste

Finalizar Teste

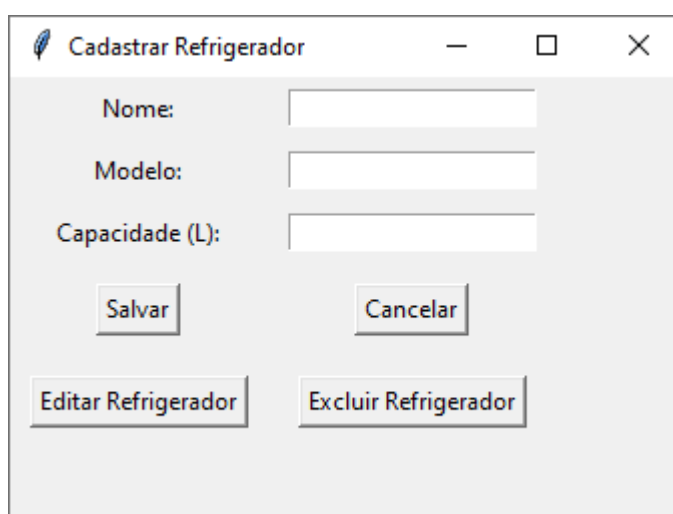
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 33 - Tela padrão do Monitor de Consumo Energético.



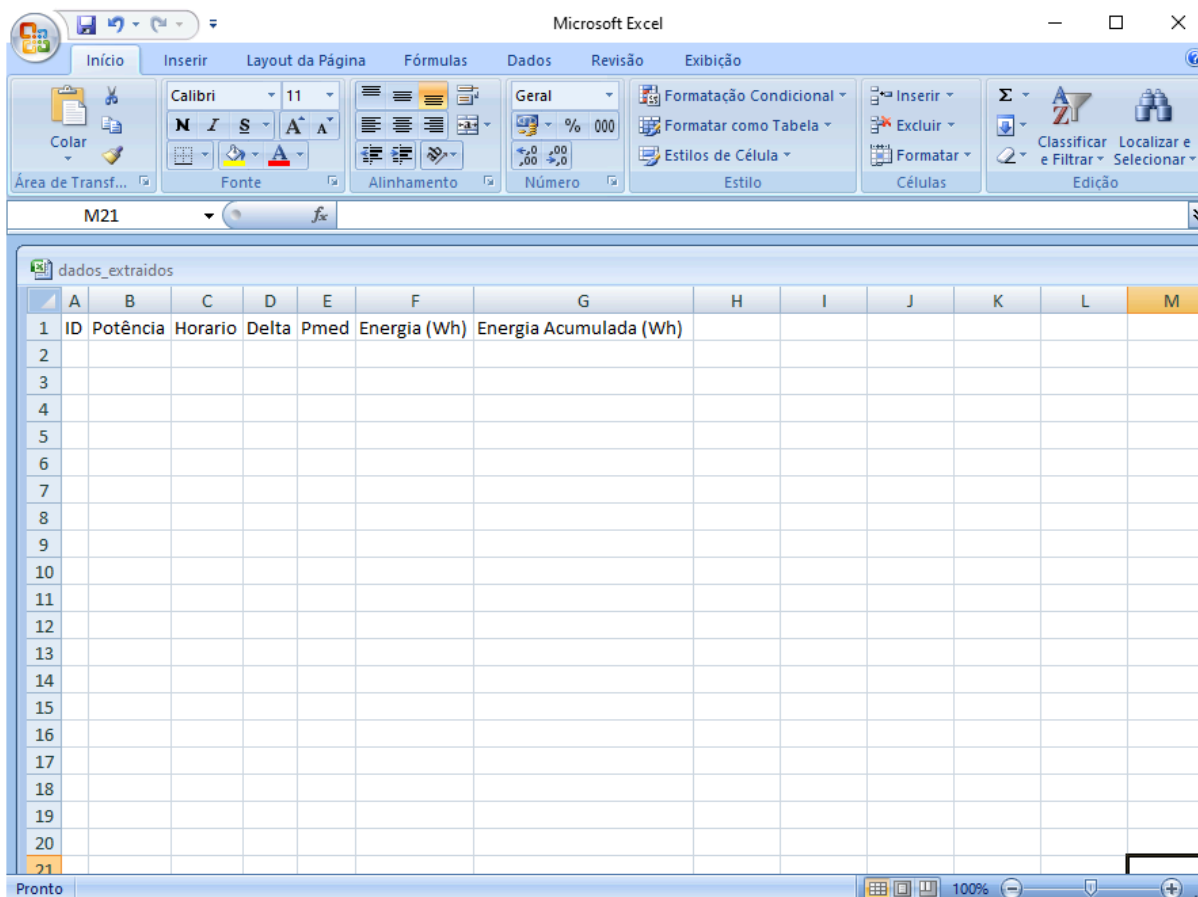
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 34 - Tela padrão de Cadastrar Refrigerador.

A screenshot of a software window titled "Cadastrar Refrigerador". The window has a standard Windows-style title bar. The main content area is a light gray color. It contains three text input fields with labels "Nome:", "Modelo:", and "Capacidade (L):" to their left. Below the input fields, there are four buttons arranged in two rows: "Salvar" and "Cancelar" in the first row, and "Editar Refrigerador" and "Excluir Refrigerador" in the second row. All buttons have a light gray background and a thin black border.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 35 - Arquivo de Dados Extraídos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.9 Definição dos parâmetros a serem editados no software

A tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores tem o propósito de receber e exibir os dados do microcontrolador, exibir os cálculos de média móvel, configurar os parâmetros a serem editados, exibir as variáveis, emitir alertas de transição para gerar o relatório de teste contendo as últimas informações dos dados de média móvel e da transição de estados. Nessa tela os parâmetros de consumo mensal, de temperatura e seus limites superiores e inferiores serão utilizados para serem comparados com os valores médios coletados no *hardware* e gerar alarmes, tais que são mostrados na Figura 36.

O valor da tarifa de energia é obtido a partir da nota fiscal eletrônica de energia elétrica da concessionária e é composto dos seguintes elementos (CELESC, 2025):

- a) Tarifa: valor monetário estabelecido pela ANEEL, fixado em R\$ (Reais) por unidade de energia elétrica ativa ou da demanda de potência ativa;

- b) Tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD): valor monetário unitário determinado pela ANEEL, em R\$/MWh ou em R\$/kW, utilizado para efetuar o faturamento mensal de usuários do sistema de distribuição de energia elétrica pelo uso do sistema;
- c) Bandeiras tarifárias: sistema tarifário que tem como finalidade sinalizar aos consumidores faturados pela distribuidora por meio da tarifa de energia, os custos atuais da geração de energia elétrica;
- d) Tributos e encargos: são todos os impostos, taxas e contribuições, incidentes sobre o objeto.

Os valores de potência nominal, tensão nominal e consumo mensal nominal podem ser retirados da folha de dados do refrigerador ou da tabela de Refrigeradores e Assemelhados (INMETRO,2023).

A Tabela 7 mostra os parâmetros a serem editados e o significado deles.

Figura 36 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores.

Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores

Item testado: N/A

Atualizar Variáveis

Tempo Decorrido: 0:00:00 | Iniciado em:

Pausado em: N/A
Continuado em: N/A
Finalizado em: N/A
Dia Programado: N/A
Horário de Início: N/A
Horário de Fim: N/A
Tempo Restante: N/A

Continuar Teste
Pausar Teste
Finalizar Teste

Legenda

- REFRIGERADOR A SER TESTADO
- MÉDIA MOVEL DOS VALORES
- DADOS SENDO RECEBIDOS
- BOTÕES
- PARÂMETROS TEMPORÁRIOS
- VALORES RELACIONADOS AO CONSUMO
- VALORES RELACIONADOS À ENERGIA

Tarifa Energia (R\$/kWh):	0.8
Potência Nominal (W):	218.0
Tensão Nominal (V):	220.0
Consumo Mensal Nominal (kWh):	35.3
Limite Inferior do Consumo Mensal Nominal(kWh):	52.0
Limite Superior do Consumo Mensal Nominal (kWh):	57.0
Limite Inferior Sensor Temperatura 1 (°C):	25.0
Limite Superior Sensor Temperatura 1 (°C):	27.0
Limite Inferior Sensor Temperatura 2 (°C):	25.0
Limite Superior Sensor Temperatura 2 (°C):	27.0

Média Temperatura: N/A
Média Temperatura2: N/A
Média Tensão: N/A
Média Corrente: N/A
Média Potência: N/A
Média Potência Aparente: N/A
Média Potência Reativa: N/A

Consumo Mensal Estimado: N/A
Diferença Absoluta do Consumo: N/A
Porcentagem Relativa do Consumo: N/A

Custo Mensal Estimado: N/A
Energia Consumida: N/A
Custo Total da Energia: N/A

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 7 - Parâmetros a serem editados no *software*.

Parâmetros	Significado
Tarifa Energia (R\$/kWh)	Valor a ser pago por kWh
Potência Nominal (W)	Potência nominal do refrigerador
Tensão Nominal (V)	Tensão nominal do refrigerador
Consumo Mensal Nominal (kWh)	Consumo mensal do refrigerador
Limite Inferior do Consumo Mensal Nominal (kWh)	Limite inferior do consumo mensal do refrigerador
Limite Superior do Consumo Mensal Nominal (kWh)	Limite superior do consumo mensal do refrigerador
Limite Inferior de Temperatura Ambiente (°C)	Limite inferior do sensor de temperatura ambiente
Limite Superior de Temperatura Ambiente (°C)	Limite superior do sensor de temperatura ambiente
Limite Inferior de Temperatura Interna (°C)	Limite inferior do sensor de temperatura interna
Limite Superior de Temperatura Interna (°C)	Limite superior do sensor de temperatura interna

Fonte: Elaboração própria.

3.10 Exibição dos dados coletados e calculados no *software*

Na tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores mostrado na Figura 33, os dados coletados (temperatura, tensão, corrente, potência ativa) são transformados em valores médios que, por sua vez, são calculados por média móvel.

O valor de consumo mensal estimado, a diferença absoluta do consumo e a porcentagem relativa ao consumo são calculados utilizando as equações 35,36 e 37 respectivamente:

$$Consumo_{mensal_{estimado}} = \left(\frac{Potência_{média}}{1000} \right) * 24 * 30 \quad (35)$$

$$Diferença_{absoluta_{consumo}} = Consumo_{mensal_{estimado}} - Consumo_{mensal_{nominal}} \quad (36)$$

$$Porcentagem_{relativa_{consumo}} = \left(\frac{Diferença_{absoluta_{consumo}}}{Consumo_{mensal_{nominal}}} \right) * 100 \quad (37)$$

Em que:

- a) $Consumo_{mensal_{estimado}}$ é o consumo mensal estimado do refrigerador;
- b) $Potência_{média}$ é a média móvel dos valores de potência coletados;
- c) $Diferença_{absoluta_{consumo}}$ é a diferença absoluta do consumo;
- d) $Consumo_{mensal_{nominal}}$ é o consumo mensal nominal editado do refrigerador;
- e) $Porcentagem_{relativa_{consumo}}$ é a porcentagem relativa ao consumo.

A Tabela 8 mostra os valores dos parâmetros a serem coletados e calculados, bem como o significado deles.

Tabela 8 - Valores de parâmetros a serem coletados e calculados no *software*.

Parâmetros	Significado
Média Temperatura	Média móvel do valor do sensor de temperatura ambiente
Média Temperatura ²	Média móvel do valor do sensor de temperatura interna
Média Tensão	Média móvel de tensão do sensor de energia
Média Corrente	Média móvel do valor de corrente do sensor de energia
Média Potência	Média móvel do valor de potência ativa do sensor de energia
Média Potência Aparente	Média móvel do valor de potência aparente do sensor de energia
Média Potência Reativa	Média móvel do valor de potência reativa do sensor de energia
Consumo Mensal Estimado	Valor aproximado da potência média consumida em kWh no mês
Diferença Absoluta do Consumo	Diferença do consumo calculado e do consumo nominal
Porcentagem Relativa do Consumo	Porcentagem do consumo calculado e do consumo nominal
Custo Mensal Estimado	É o valor do custo baseado no consumo em kWh e na tarifa de energia
Energia Consumida	É o gasto de energia baseado na potência média e no tempo decorrido
Custo Total da Energia	É o valor do custo baseado no gasto de energia e na tarifa de energia

Fonte: Elaboração própria.

3.11 Definição dos parâmetros temporais a serem exibidos no *software*

A Tabela 9 mostra os valores dos parâmetros temporais a serem exibidos e o significado deles.

Tabela 9 - Parâmetros temporais a serem exibidos no *software*.

Parâmetros	Significado
Tempo decorrido	Tempo de andamento de teste
Iniciado em	Data e horário que o teste foi iniciado
Pausado em	Data e horário que o teste foi pausado
Continuado em	Data e horário que o teste foi continuado após ser pausado
Finalizado	Data e horário que o teste foi finalizado
Dia Programado	Dia que o teste foi programado para iniciar
Horário de Início	Horário que o teste foi programado para iniciar
Horário de Fim	Horário que o teste foi programado para finalizar
Tempo Restante	Tempo que resta para terminar o teste programado

Fonte: Elaboração própria.

3.12 Definição dos parâmetros dos sensores a serem processados no *software*

A Tabela 10 mostra os parâmetros dos sensores a serem processados no *software*, bem como o significado deles.

Tabela 10 - Parâmetros a serem processados no *software*.

Parâmetros	Significado
Temperatura	Valor do sensor de temperatura ambiente
Temperatura2	Valor do sensor de temperatura interna
Voltage	Valor de tensão do sensor de energia
Current	Valor de corrente do sensor de energia
Power	Valor de potência ativa do sensor de energia
Frequency	Valor de frequência do sensor de energia
PF	Valor de fator de potência do sensor de energia
Sensor Porta	Valor do sensor de porta

Fonte: Elaboração própria.

3.13 Definição dos botões de *software*

A Tabela 11 mostra os botões de *software* utilizados e o significado deles.

Tabela 11 - Botões da tela do analisador.

Parâmetros	Significado
Atualizar Variáveis	Botão que atualiza os parâmetros a serem editados
Continuar Teste	Botão que continua o teste após o mesmo ser pausado
Pausar Teste	Botão que pausa o teste após o mesmo ser iniciado e/ou pausado
Finalizar Teste	Botão que finaliza o teste após o mesmo ser iniciado, continuado e/ou pausado

Fonte: Elaboração própria.

3.14 Definição dos alarmes de *software*

A Tabela 12 mostra os alertas de *software* utilizados e o significado deles.

Tabela 12 - Alertas da tela do analisador.

Parâmetros	Significado
Alerta: Consumo abaixo da média!	O consumo está abaixo dos parâmetros de consumo editados
Alerta: Consumo dentro da média!	O consumo está dentro dos parâmetros de consumo editados
Alerta: Consumo acima da média!	O consumo está acima dos parâmetros de consumo editados
Alerta: Temperatura do Sensor 1 abaixo da média!	A temperatura ambiente do sensor está abaixo dos parâmetros editados
Alerta: Temperatura do Sensor 1 dentro da média!	A temperatura ambiente do sensor está dentro dos parâmetros editados
Alerta: Temperatura do Sensor 1 acima da média!	A temperatura ambiente do sensor está acima dos parâmetros editados
Alerta: Temperatura do Sensor 2 abaixo da média!	A temperatura interna do sensor está abaixo dos parâmetros editados
Alerta: Temperatura do Sensor 2 dentro da média!	A temperatura interna do sensor está dentro dos parâmetros editados
Alerta: Temperatura do Sensor 2 acima da média!	A temperatura interna do sensor está acima dos parâmetros editados
Alerta: Porta aberta!	O sensor indica que a porta do refrigerador está aberta
Alerta: Porta fechada!!	O sensor indica que a porta do refrigerador está fechada

Fonte: Elaboração própria.

3.15 Coleta de dados

Após conectar o *hardware* com o *software* via USB foi necessário cadastrar um refrigerador. Com o refrigerador cadastrado foi iniciado um teste. Após o início do teste ou do teste personalizado os seguintes dados coletados do *hardware* foram

processados pelo *software* no formato de um pacote de dados em intervalos regulares como é mostrado na amostra a seguir:

- ID= 1
- 2025-02-07 23:41:42
- Temperatura: 35.44 °C
- Temperatura2: 26.12 °C
- Voltage: 208.60 V
- Current: 0.07 A
- Power: 0.50 W
- Frequency: 60.0 Hz
- PF: 0.01

O pacote de dados também foi enviado para um *smartphone* via módulo *Bluetooth*, sem a necessidade de conexão com o *software*, mas sim diretamente do *hardware*.

3.16 Registro de dados

Os dados coletados foram registrados em um arquivo bloco de notas no formato .txt. Esses dados foram utilizados para fazer cálculos de média móvel e para serem comparados com os valores previamente editados no *software* com objetivo de gerar alarmes de consumo, de temperatura e de porta aberta ou fechada.

Para calcular a energia consumida durante os testes foi criado automaticamente pelo *software* um arquivo .xlsx que fez a extração do valor de todas as amostras das potência ativa presentes no arquivo .txt, bem como o intervalo de cada amostra, multiplicou esses dois valores e o transformou em watt-hora e armazenou no próprio arquivo .xlsx. A energia acumulada foi, portanto, a soma de todas as amostras de energia armazenadas em tal arquivo. O consumo mensal estimado foi calculado utilizando a energia acumulada dividido pelo tempo decorrido em segundos, em seguida é multiplicado pelo número de dias do mês e pela quantidade de horas de um mês e por fim dividido por mil para ser transformado em quilowatt-hora. O custo da energia foi calculado multiplicando o valor do consumo mensal estimado pelo valor da tarifa previamente editado.

Quando o teste padrão ou o teste personalizado é finalizado foi gerado um

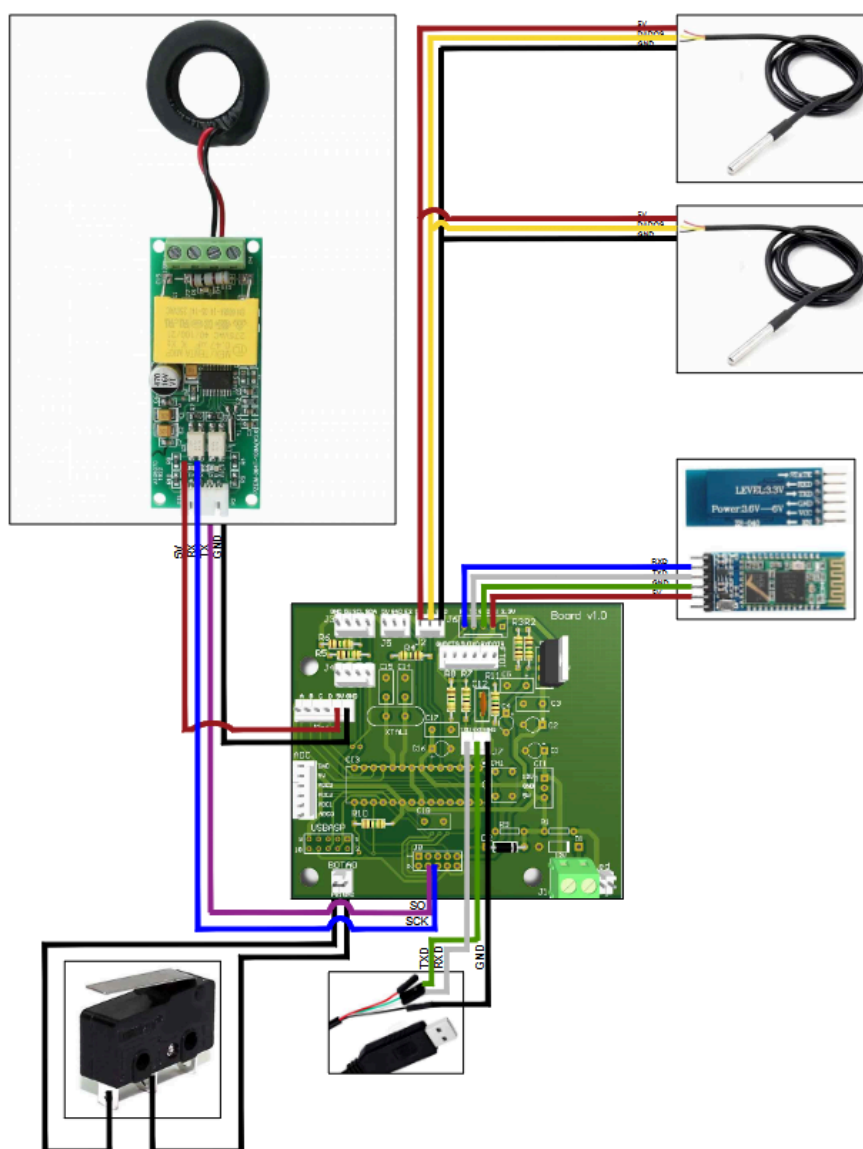
relatório contendo as seguintes informações:

- Nome do refrigerador cadastrado;
- Data e horário de início do teste;
- Data e horário de fim do teste;
- Horários de pausa;
- Horários de continuação;
- Horários de atualização;
- Transição de alertas de consumo;
- Transição de alertas de temperatura ambiente do sensor 1;
- Transição de alertas de temperatura interna do sensor 2;
- Transição de alertas do sensor de abertura de porta.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os testes a serem realizados nesta sessão contemplam os sensores de temperatura, o sensor de energia, o sensor de porta, a comunicação de dados serial e a comunicação de dados utilizando *bluetooth*, os quais foram baseados na montagem ilustrada na Figura 37.

Figura 37 - Integração dos componentes.



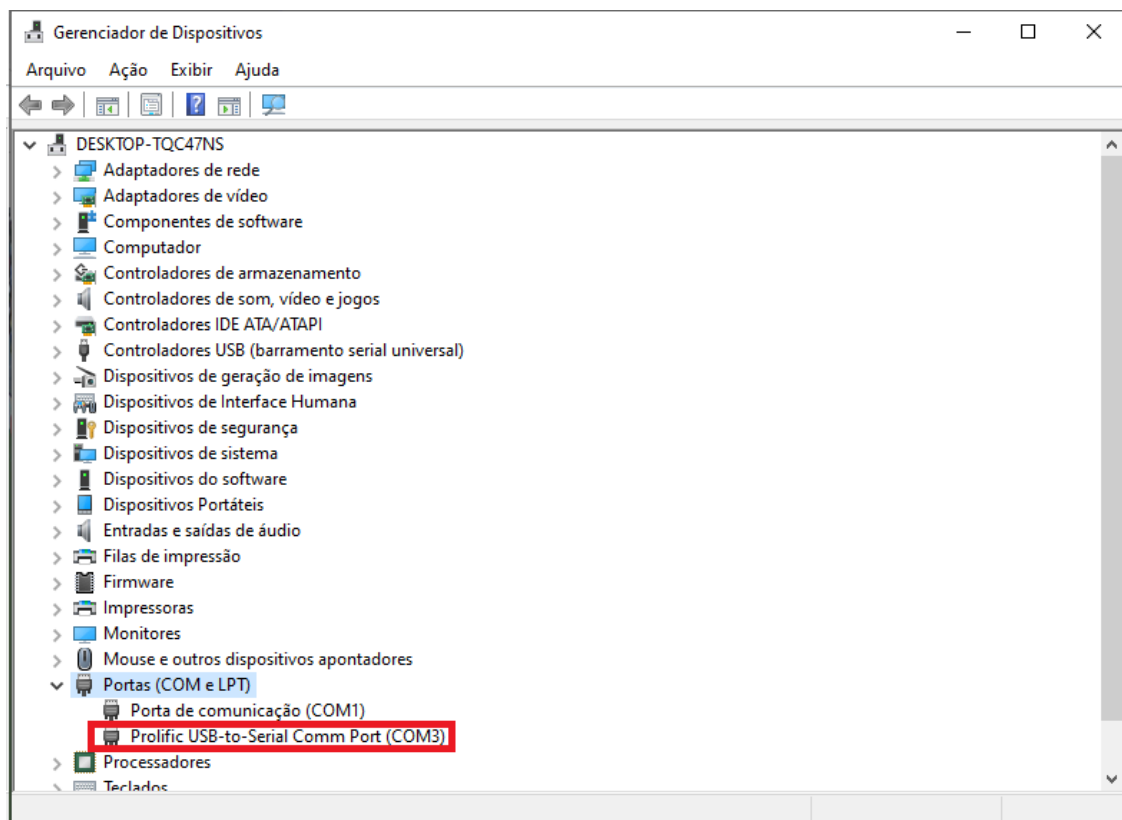
Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1 Teste de comunicação de dados entre a PCB e o *software* em *Python*

Esse teste tem a função de validar a comunicação entre a PCB e o *software* em *Python*. Para isso foram utilizados os seguintes passos:

- 1) Fazer as conexões conforme a Figura 37;
- 2) Inserir o cabo de comunicação serial no computador;
- 3) Instalar o *driver* do cabo de comunicação para emular a porta de comunicação;
- 4) Abrir o gerenciador de dispositivos e verificar a porta de comunicação conforme a Figura 38;
- 5) Selecionar a mesma porta de comunicação no *software* em *Python*;
- 6) Abrir o *software* em *Python*.

Figura 38 - Porta de comunicação na tela do gerenciador de dispositivos.



Fonte: Elaboração própria (Windows 10, 2025).

4.2 Teste de Cadastro de Refrigerador

Para cadastrar um refrigerador deve ser clicado no botão Cadastrar Refrigerador na tela de cadastro de Refrigeradores. Como ilustrado na Figura 39 (b), deve ser preenchido o Nome, Modelo e a Capacidade (L). Para Salvar os dados deve ser clicado no botão Salvar.

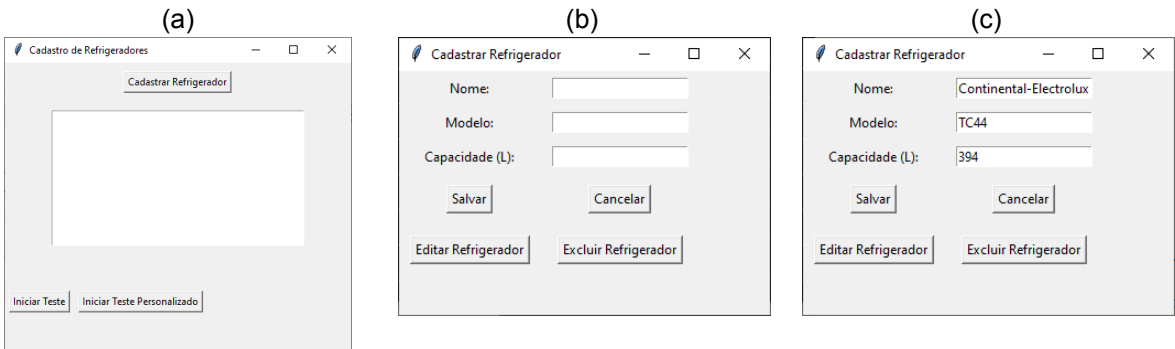
Para cancelar o cadastro deve ser clicado no botão Cancelar. Os parâmetros principais do equipamento testado são mostrados na Tabela 13. A tensão de operação, a corrente, a potência em degelo e o consumo devem ser utilizados como parâmetros a serem editados na Tela do Analisador de Consumo Energético, mostrado na Figura 36.

Tabela 13 - Parâmetros do refrigerador testado.

Equipamento testado	Descrição
Capacidade total de armazenamento	394 L
Tensão de operação	220 V
Corrente	1,08 A
Potência em degelo	218 W
Consumo	55,3 kWh

Fonte: Continental Brasil (2025).

Figura 39 - (a) Tela de cadastro e testes de refrigeradores; (b) tela com os dados a serem preenchidos e (c) tela com os dados preenchidos.



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 14 mostra os botões e os campos de *software* utilizados nas telas e o significado deles.

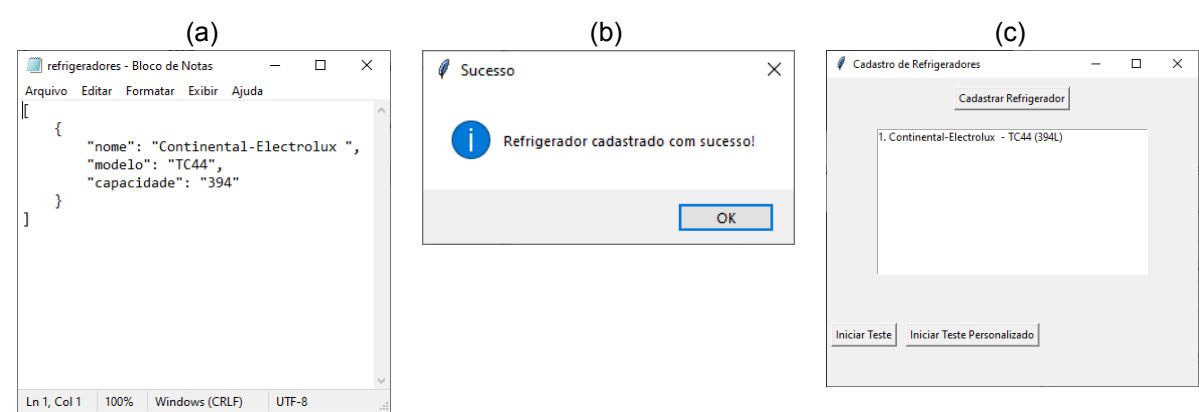
Tabela 14 - Campos e botões da tela de edição de refrigerador.

Parâmetros	Significado
Cadastrar Refrigerador	Botão que faz o cadastro, edita e exclui um refrigerador
Iniciar Teste	Botão que inicia um teste para um refrigerador cadastrado
Iniciar Teste Personalizado	Botão que inicia um teste personalizado para um refrigerador cadastrado
Nome	Campo para que seja inserido o nome do refrigerador
Modelo	Campo para que seja inserido o modelo do refrigerador
Capacidade (L)	Campo para que seja inserido a capacidade em litros do refrigerador
Salvar	Botão que salva as informações contidas nos campos nome, modelo e capacidade
Cancelar	Botão que cancela o cadastro de um refrigerador
Editar Refrigerador	Botão que edita as informações de um refrigerador cadastrado
Excluir Refrigerador	Botão que exclui um refrigerador cadastrado

Fonte: Elaboração própria.

Após preencher os dados e clicar no botão salvar, é criado um arquivo fonte JSON conforme os dados foram preenchidos como mostra a Figura 40.

Figura 40 - (a) Arquivo fonte JSON; (b) tela com os dados a serem preenchidos e (c) tela de cadastro e testes de refrigeradores;



Fonte: Elaboração própria.

4.3 Testes de um refrigerador cadastrado

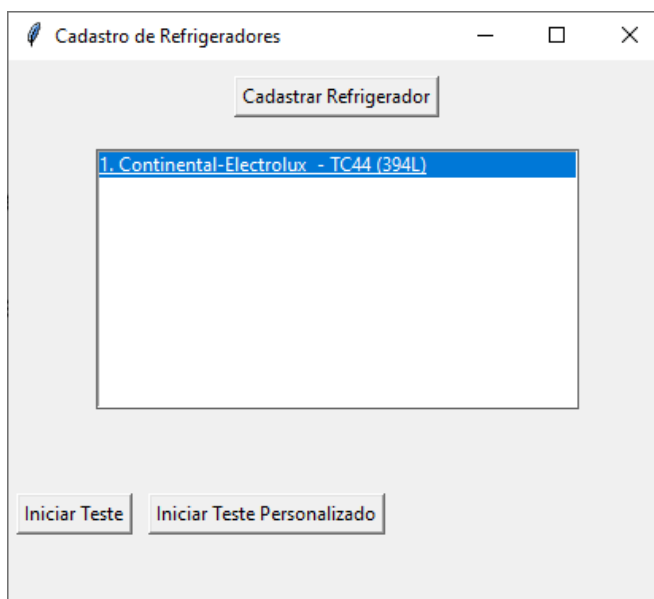
Após cadastrar um refrigerador é possível fazer dois tipos de testes:

- Iniciar Teste
- Teste Personalizado.

4.3.1 Teste de um refrigerador cadastrado

Após cadastrar um refrigerador o mesmo deve ser selecionado e em seguida clicar no botão Iniciar Teste como mostra a Figura 41.

Figura 41 - Tela de cadastro e testes de refrigeradores;.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao iniciar o teste é criado um arquivo denominado `dados_arduino_indefinido.txt`. Nesse arquivo são coletados os dados enviados pelo *hardware* e processados pelo *software* como mostra a Figura 42.

Na tela de Monitor de Consumo energético é possível verificar os dados sendo processados como mostra a Figura 43.

Figura 42 - Registro de dados do *hardware* extraídos para o arquivo .txt.

*relatorio_teste_20250317_232100.txt - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Relatório de Teste - 17/03/2025 23:21:00

Refrigerador Testado: Item testado: 1. electrolux-continental - TC44

Início do Teste: 17-03-2025 22:21:00

Fim do Teste: 17-03-2025 23:21:00

Horários de Pausa:

Nenhuma pausa registrada.

Horários de Continuação:

Nenhuma continuação registrada.

Horários de Atualização:

Nenhuma atualização registrada.

Energia Consumida: Energia: 0.137338 kWh

Custo Total: Custo Total: R\$ 0.10987000

Consumo Mensal Estimado: Consumo Mensal Estimado: 98.90 kWh

Erro Absoluto do Consumo: Diferença Absoluta do Consumo: 43.60 kWh

Erro Relativo do Consumo: Porcentagem Relativa do Consumo: 78.84 %

Custo Mensal Estimado: Custo Mensal Estimado: R\$ 79.12

Transições de Alertas:

Consumo:

Transição de Consumo: abaixo em 17-03-2025 22:21:00

Transição de Consumo: dentro em 17-03-2025 22:21:02

Transição de Consumo: acima em 17-03-2025 22:21:02

Transição de Consumo: abaixo em 17-03-2025 23:09:27

Transição de Consumo: acima em 17-03-2025 23:14:22

Temperatura Sensor 1:

Transição de Temperatura Sensor 1: dentro em 17-03-2025 22:21:00

Temperatura Sensor 2:

Transição de Temperatura Sensor 2: abaixo em 17-03-2025 22:21:00

Transição de Temperatura Sensor 2: dentro em 17-03-2025 22:21:01

Transição de Temperatura Sensor 2: abaixo em 17-03-2025 22:29:48

Transição de Temperatura Sensor 2: dentro em 17-03-2025 22:31:07

Transição de Temperatura Sensor 2: abaixo em 17-03-2025 22:39:01

Transição de Temperatura Sensor 2: dentro em 17-03-2025 22:39:09

Transição de Temperatura Sensor 2: abaixo em 17-03-2025 22:39:20

Transição de Temperatura Sensor 2: dentro em 17-03-2025 22:41:10

Transição de Temperatura Sensor 2: abaixo em 17-03-2025 22:44:53

Transição de Temperatura Sensor 2: dentro em 17-03-2025 22:51:25

Transição de Temperatura Sensor 2: acima em 17-03-2025 23:11:30

Transição de Temperatura Sensor 2: dentro em 17-03-2025 23:12:24

Sensor de Porta:

Transição: Porta fechada em 17-03-2025 22:21:00

Transição: Porta aberta em 17-03-2025 22:31:04

Transição: Porta fechada em 17-03-2025 22:31:20

Transição: Porta aberta em 17-03-2025 22:41:05

Transição: Porta fechada em 17-03-2025 22:41:21

Transição: Porta aberta em 17-03-2025 22:51:20

Transição: Porta fechada em 17-03-2025 22:51:36

Transição: Porta aberta em 17-03-2025 23:01:10

Transição: Porta fechada em 17-03-2025 23:01:26

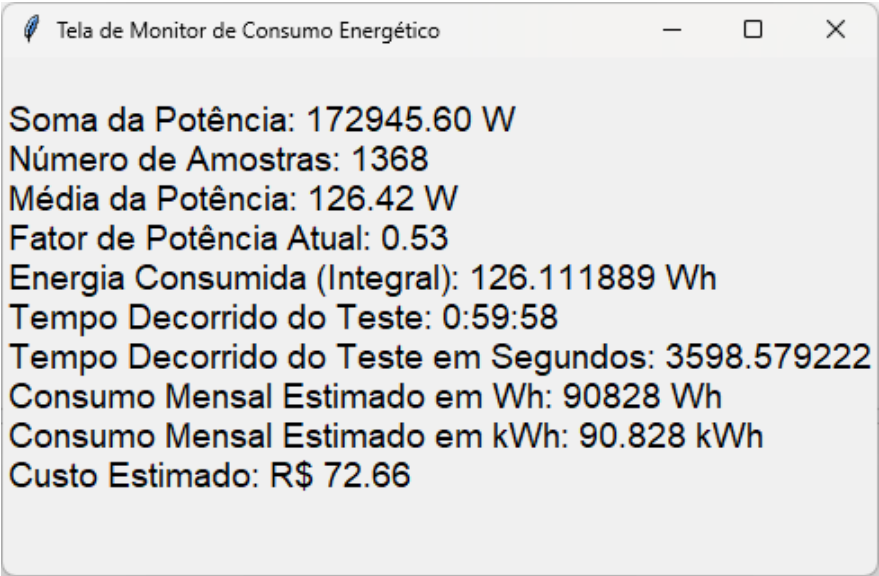
Transição: Porta aberta em 17-03-2025 23:11:12

Transição: Porta fechada em 17-03-2025 23:11:30

Ln 53, Col 160%Windows (CRLF)ANSI

Fonte: Elaboração própria (2025).

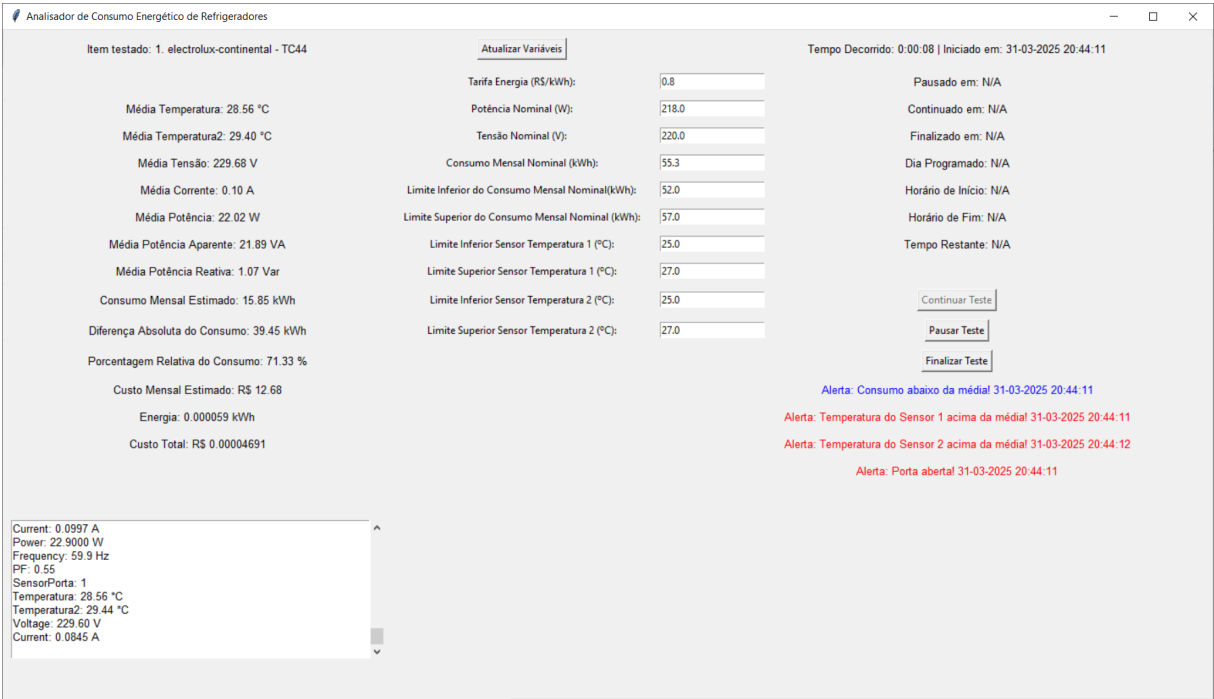
Figura 43 - Tela do Monitor de Consumo Energético com os dados sendo processados



Fonte: Elaboração própria (2025).

Na tela do Analisador de Consumo Energético mostrado na Figura 44 é possível ver os dados sendo processados.

Figura 44 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores com os dados sendo processados



Fonte: Elaboração própria (2025).

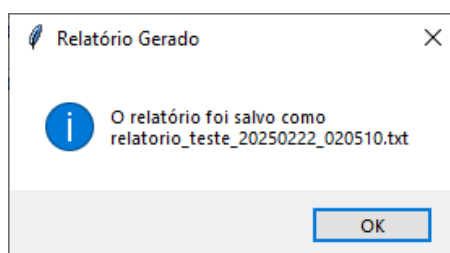
Para pausar o teste deve ser pressionado o botão Pausar Teste. Ao fazer isso é habilitado o botão Continuar Teste e desabilitado o botão Pausar Teste. No estado de teste pausado, os dados de todas as janelas do *software* param de ser processados.

Ao pressionar o botão Continuar Teste é habilitado o botão Pausar Teste e desabilitado o botão Continuar Teste. Ao fazer isso, os dados de todas as janelas começam a ser processados.

O processo de pausa e continuação pode ser feito diversas vezes. Estando em ambos os estados ao pressionar o botão Finalizar teste, o teste é finalizado.

Quando o teste é finalizado os dados de todas as janelas param de ser processados é exibido um aviso de relatório gerado como mostra a Figura 45.

Figura 45 - Tela de aviso de relatório gerado.



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3.2 Teste personalizado de um refrigerador cadastrado

Para configurar um teste personalizado deve ser clicado no botão Iniciar Teste Personalizado como mostrado na Figura 41. Em seguida, a tela de Configurar Teste personalizado é aberta. Deve ser preenchido os campos com os horários de início e fim de teste como mostra a Figura 46 e pressionado o botão Iniciar Teste. A Tabela 15 mostra os botões e os campos de *software* utilizados nessa tela e o significado deles.

Tabela 15 - Campos e botões da tela de teste personalizado.

Parâmetros	Significado
Selecione o dia	Campo para que seja escolhido o dia do teste
Horário de Início (HH:MM)	Campo para que seja horário de início de teste
Horário de Fim (HH:MM)	Campo para que seja horário de fim de teste
Iniciar Teste	Botão que inicia um teste para um refrigerador cadastrado
Cancelar	Botão que cancela a teste personalizado

Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 - Tela de configuração de teste personalizado.

Configurar Teste Personalizado

Selecione o dia:

	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun
9	24	25	26	27	28	1	2
10	3	4	5	6	7	8	9
11	10	11	12	13	14	15	16
12	17	18	19	20	21	22	23
13	24	25	26	27	28	29	30
14	31	1	2	3	4	5	6

Horário de Início (HH:MM):

20:50

Horário de Fim (HH:MM):

21:00

Iniciar Teste

Cancelar

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após isso na tela do Analisador de Consumo Energético mostrado na Figura 47 é possível ver os dados temporais configurados. Quando o tempo de início de teste é alcançado, o teste personalizado é iniciado como mostra a Figura 48 e o funcionamento das telas bem como o registro dos dados e o relatório gerados a partir daqui é igual ao descrito no teste padrão. O teste personalizado pode ser finalizado via botão ou aguardando o tempo de fim de teste previamente configurado.

Figura 47 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores com os dados configurados referentes ao teste personalizado

Analizador de Consumo Energético de Refrigeradores

Item testado: N/A

Média Temperatura: N/A

Média Temperatura2: N/A

Média Tensão: N/A

Média Corrente: N/A

Média Potência: N/A

Média Potência Aparente: N/A

Média Potência Reativa: N/A

Consumo Mensal Estimado: N/A

Diferença Absoluta do Consumo: N/A

Porcentagem Relativa do Consumo: N/A

Custo Mensal Estimado: N/A

Energia Consumida: N/A

Custo Total da Energia: N/A

Atualizar Variáveis

Tarifa Energia (R\$/kWh): 0.8

Potência Nominal (W): 218.0

Tensão Nominal (V): 220.0

Consumo Mensal Nominal (kWh): 55.3

Limite Inferior do Consumo Mensal Nominal(kWh): 52.0

Limite Superior do Consumo Mensal Nominal (kWh): 57.0

Limite Inferior Sensor Temperatura 1 (°C): 25.0

Limite Superior Sensor Temperatura 1 (°C): 27.0

Limite Inferior Sensor Temperatura 2 (°C): 25.0

Limite Superior Sensor Temperatura 2 (°C): 27.0

Tempo Decorrido: 0:00:00 | Iniciado em:

Pausado em: N/A

Continuado em: N/A

Finalizado em: N/A

Dia Programado: 31/03/2025

Horário de Início: 20:50

Horário de Fim: 21:00

Tempo Restante: 00:01:21

Continuar Teste

Pausar Teste

Finalizar Teste

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 48 - Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores com o teste personalizado em andamento.

Item testado: 1. electrolux-continental - TC44

Média Temperatura: 28.56 °C
Média Temperatura2: 29.37 °C
Média Tensão: 230.30 V
Média Corrente: 0.12 A
Média Potência: 27.76 W
Média Potência Aparente: 27.15 VA
Média Potência Reativa: 1.57 Var
Consumo Mensal Estimado: 19.99 kWh
Diferença Absoluta do Consumo: 35.31 kWh
Porcentagem Relativa do Consumo: 63.86 %
Custo Mensal Estimado: R\$ 15.99
Energia: 0.000703 kWh
Custo Total: R\$ 0.00056242

Atualizar Variáveis

Tarifa Energia (R\$/kWh):	0.8
Potência Nominal (W):	218.0
Tensão Nominal (V):	220.0
Consumo Mensal Nominal (kWh):	55.3
Limite Inferior do Consumo Mensal Nominal (kWh):	52.0
Limite Superior do Consumo Mensal Nominal (kWh):	57.0
Limite Inferior Sensor Temperatura 1 (°C):	25.0
Limite Superior Sensor Temperatura 1 (°C):	27.0
Limite Inferior Sensor Temperatura 2 (°C):	25.0
Limite Superior Sensor Temperatura 2 (°C):	27.0

Tempo Decorrido: 0:01:30 | Iniciado em: 31-03-2025 20:50:00

Pausado em: N/A
Continuado em: N/A
Finalizado em: N/A
Dia Programado: 31/03/2025
Horário de Início: 20:50
Horário de Fim: 21:00
Tempo Restante: 00:08:29

Continuar Teste
Pausar Teste
Finalizar Teste

Alerta: Consumo abaixo da média! 31-03-2025 20:50:00
Alerta: Temperatura do Sensor 1 acima da média! 31-03-2025 20:50:00
Alerta: Temperatura do Sensor 2 acima da média! 31-03-2025 20:50:01
Alerta: Porta aberta! 31-03-2025 20:50:00

SensorPorta: 1
Temperatura: 28.56 °C
Temperatura2: 29.37 °C
Voltage: 230.30 V
Current: 0.0881 A
Power: 20.3000 W
Frequency: 60.0 Hz
PF: 0.58
SensorPorta: 1

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3.3 Tela de Monitor de Consumo Energético

O dado de potência ativa e o dado de fator de potência são coletados do arquivo de registro de dados denominado dados_arduino_indefinido.txt e, na tela do Monitor de Consumo Energético eles são processados e exibidos.

Para cada amostra registrada ela é incrementada, enquanto que os valores de potência são somados. Como existem inúmeras leituras ao longo do tempo, a média de todas as medições é mostrada pela Equação 38.

$$P_{med} = \frac{1}{N_{amostras}} \sum_{i=1}^N P_i \quad (38)$$

Em que:

- a) P_{med} é a potência média de todas as amostras;
- b) P_i é a potência da i-ésima medição;
- c) $N_{amostras}$ é o número total de amostras registrada.

Cada intervalo de tempo de cada medição é feito pela diferença de tempo de cada amostra consecutiva. Portanto, a energia acumulada (em Wh), ao longo do tempo é dada pela Equação 39:

$$Energia_{acumulada} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{med,i} \cdot \Delta t_i}{3600} \quad (39)$$

Em que:

- a) $Energia_{acumulada}$ é energia acumulada em cada intervalo;
- b) $P_{med,i}$ é a potência média no i-ésimo intervalo;
- c) N é o número total de amostras registradas;
- d) Δt_i é intervalo de tempo entre as amostras consecutivas;
- e) 3600 é o fator que converte joules para Wh.

O consumo mensal estimado é dado pela Equação 40 enquanto que o custo estimado é dado pela Equação 41.

$$Consumo_{mensal_{estimado}} = \left(\frac{Energia_{acumulada}}{Tempo_{decorrido(s)}} \right) \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600 \quad (40)$$

$$Custo_{estimado} = \frac{Consumo_{mensal_{estimado}} \cdot Tarifa_{energia}}{1000} \quad (41)$$

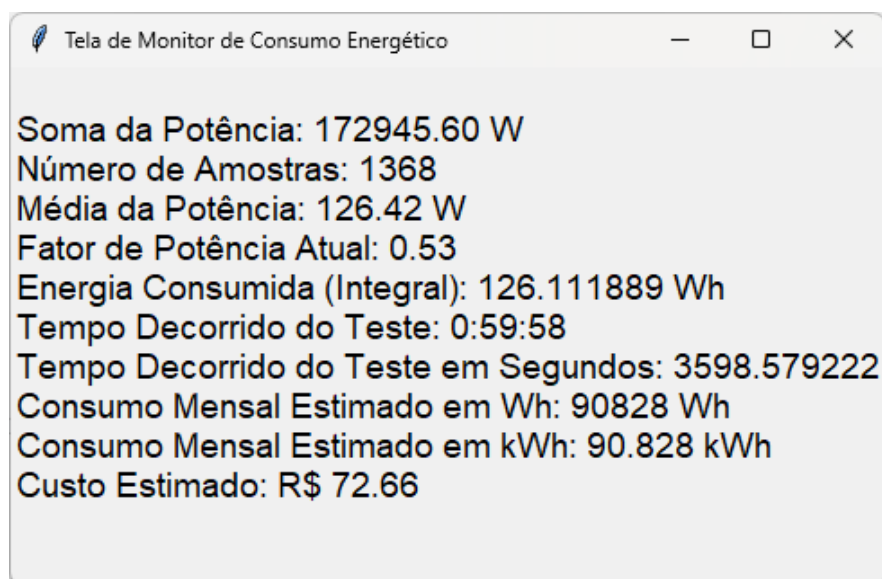
Em que:

- a) $Energia_{acumulada}$ é energia acumulada em cada intervalo em Wh;
- b) $Tempo_{decorrido(s)}$ é o tempo decorrido em segundos;
- c) $Consumo_{mensal_{estimado}}$ é o consumo mensal estimado em W;
- d) $Custo_{estimado}$ é o valor do custo estimado em R\$;

e) $Tarifa_{energia}$ é o valor do custo estimado em R\$/kWh.

A Figura 49 mostra a tela de monitor de consumo energético e a Tabela 15 mostra os parâmetros dos dados e o significado deles.

Figura 49 - Tela de Monitor de Consumo Energético.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 16 - Parâmetros da tela de consumo energético.

Parâmetros	Significado
Soma da Potência	Valor do somatório da potência das amostras do arquivo .txt
Número de Amostras	Valor da quantidade de amostras do arquivo .txt
Média da Potência	Valor da potência média de todas as amostras
Fator de Potência Atual	Valor atual do fator de potência sendo processado
Energia Consumida (Integral)	É o valor integral da energia consumida processada do arquivo.txt
Tempo Decorrido do Teste	É o tempo decorrido de teste no formato Horas-Minutos-Segundos
Tempo Decorrido do Teste em segundos	É o tempo decorrido de teste no formato segundos
Consumo Mensal Estimado em Wh	Valor do consumo mensal estimado em watt-hora
Consumo Mensal Estimado em kWh	Valor do consumo mensal estimado em quilowatt-hora
Custo Estimado em R\$	Valor do custo mensal do quilowatt-hora em reais

Fonte: Elaboração própria.

4.3.4 Registro de dados

Para ambos os testes padrão e os testes personalizados é gerado um arquivo de dados extraídos como pode ser visto na Figura 50. Esse arquivo contém os seguintes dados:

- a) *ID* é o número da amostra incrementado a cada nova leitura);
- b) *Potência* é a potência medida no momento da leitura;
- c) *Horário* é a data e o horário da medição;
- d) *Delta* é o tempo decorrido desde a última leitura em segundos;
- e) P_{med} é o média entre a potência ativa atual e a anterior em watts;
- f) *Energia (Wh)* é a energia consumida em cada intervalo de tempo;
- g) *Energia Acumulada (Wh)* é a energia total consumida no tempo decorrido.

Figura 50 - Registro de dados extraídos para uma tabela no excel.

</

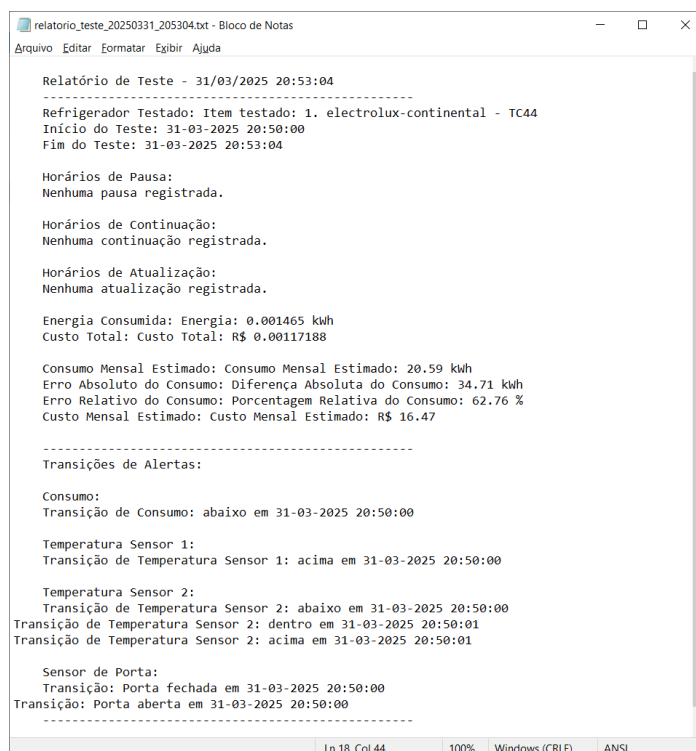
Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3.5 Relatório gerado

Para ambos os testes padrão e os testes personalizados, no fim de cada teste após pressionar o botão Finalizar teste é gerado um relatório de teste como pode ser visto na Figura 51. com os seguintes dados:

- a) Nome do relatório;
- b) Nome do refrigerador cadastrado;
- c) Data e horário de início do teste;
- d) Data e horário de fim do teste;
- e) Horários de pausa;
- f) Horários de continuação;
- g) Horários de atualização;
- h) Transição de alertas de consumo;
- i) Transição de alertas de temperatura ambiente do sensor 1;
- j) Transição de alertas de temperatura interna do sensor 2;
- k) Transição de alertas do sensor de porta.

Figura 51 - Relatório de teste gerado.



```

relatorio_teste_20250331_205304.txt - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda

Relatório de Teste - 31/03/2025 20:53:04
-----
Refrigerador Testado: Item testado: 1. electrolux-continental - TC44
Início do Teste: 31-03-2025 20:50:00
Fim do Teste: 31-03-2025 20:53:04

Horários de Pausa:
Nenhuma pausa registrada.

Horários de Continuação:
Nenhuma continuação registrada.

Horários de Atualização:
Nenhuma atualização registrada.

Energia Consumida: Energia: 0.001465 kwh
Custo Total: Custo Total: R$ 0.00117188

Consumo Mensal Estimado: Consumo Mensal Estimado: 20.59 kwh
Erro Absoluto do Consumo: Diferença Absoluta do Consumo: 34.71 kwh
Erro Relativo do Consumo: Porcentagem Relativa do Consumo: 62.76 %
Custo Mensal Estimado: Custo Mensal Estimado: R$ 16.47

-----
Transições de Alertas:

Consumo:
Transição de Consumo: abaixo em 31-03-2025 20:50:00

Temperatura Sensor 1:
Transição de Temperatura Sensor 1: acima em 31-03-2025 20:50:00

Temperatura Sensor 2:
Transição de Temperatura Sensor 2: abaixo em 31-03-2025 20:50:00
Transição de Temperatura Sensor 2: dentro em 31-03-2025 20:50:01
Transição de Temperatura Sensor 2: acima em 31-03-2025 20:50:01

Sensor de Porta:
Transição: Porta fechada em 31-03-2025 20:50:00
Transição: Porta aberta em 31-03-2025 20:50:00
-----
Ln 18, Col 44      100%  Windows (CRLF)  ANSI

```

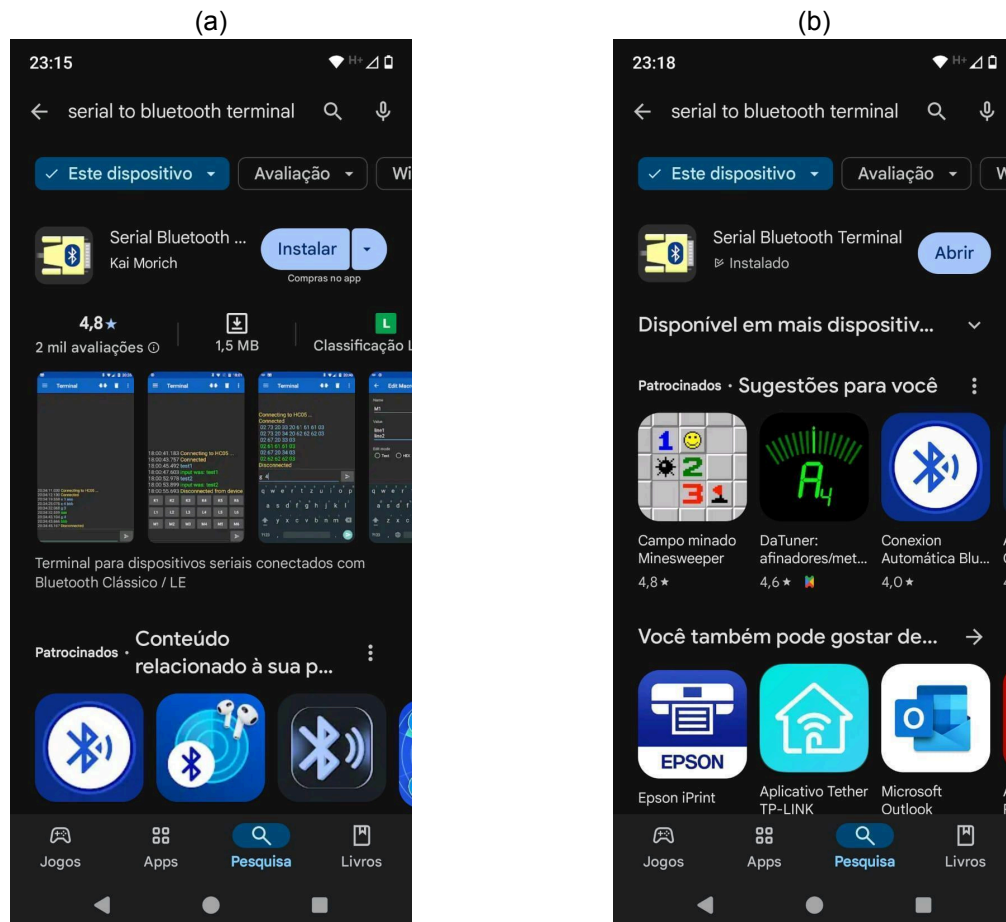
Fonte: Elaboração própria (2025).

4.4 Teste de comunicação de dados da PCB com o Smartphone

Esse teste tem a função de validar a comunicação entre a PCB e o *software* em *Python*. Para isso foram utilizados os seguintes passos:

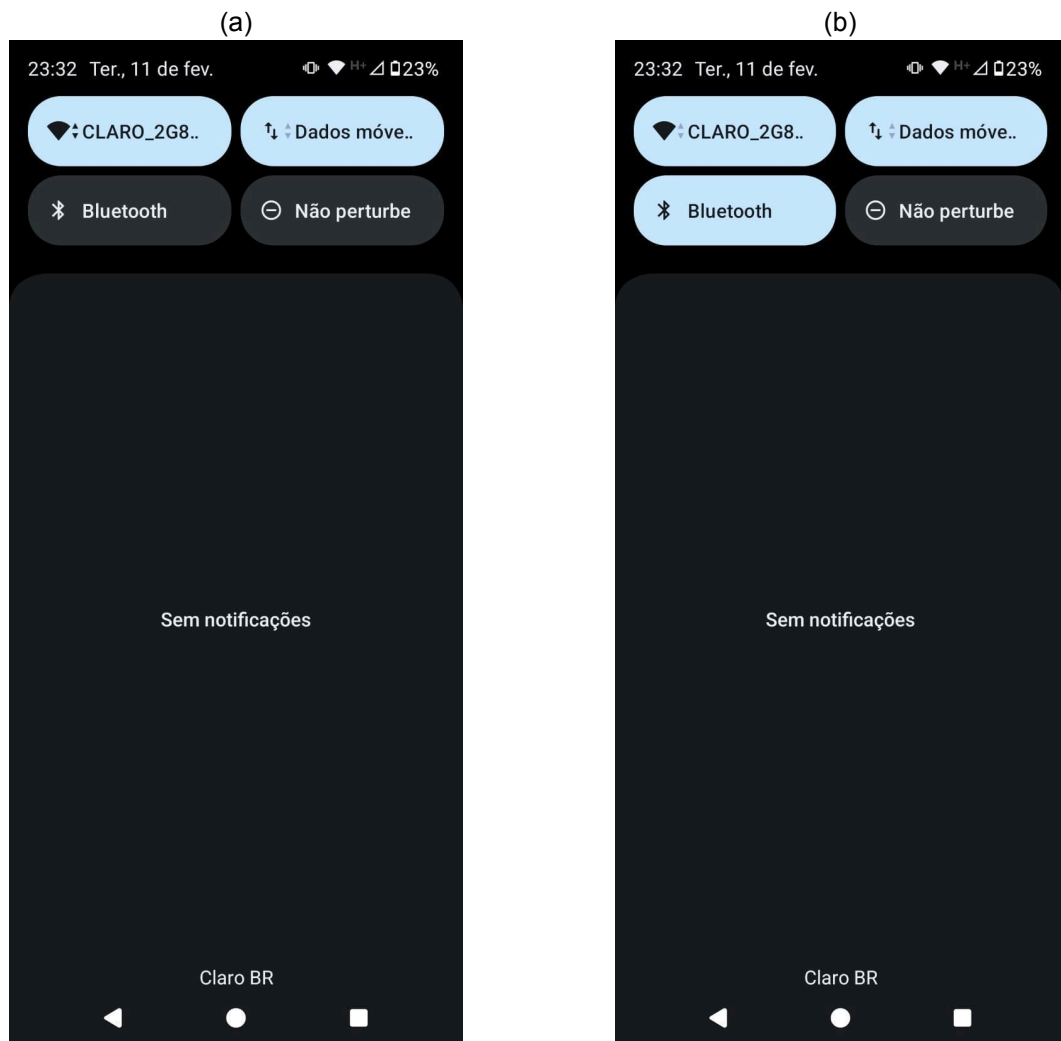
- 1) Fazer as conexões conforme a Figura 37;
- 2) Em um *smartphone* *Android* abrir a *Play Store* e instalar o aplicativo *Serial Bluetooth Terminal* conforme a Figura 52;
- 3) Habilitar o *Bluetooth* no *smartphone* conforme a Figura 53;
- 4) Energizar o *hardware*;
- 5) Na tela de *bluetooth* do *smartphone* parear novo dispositivo conforme a Figura 54;
- 6) Abrir o aplicativo *Serial Bluetooth Terminal*, clicar no botão *Connect*, clicar em permitir e visualizar os dados sendo transmitidos do *hardware* para o *smartphone* via *bluetooth*, conforme a Figura 56.

Figura 52 - Aplicativo serial to bluetooth terminal (a) antes de ser instalado (b) após ser instalado.



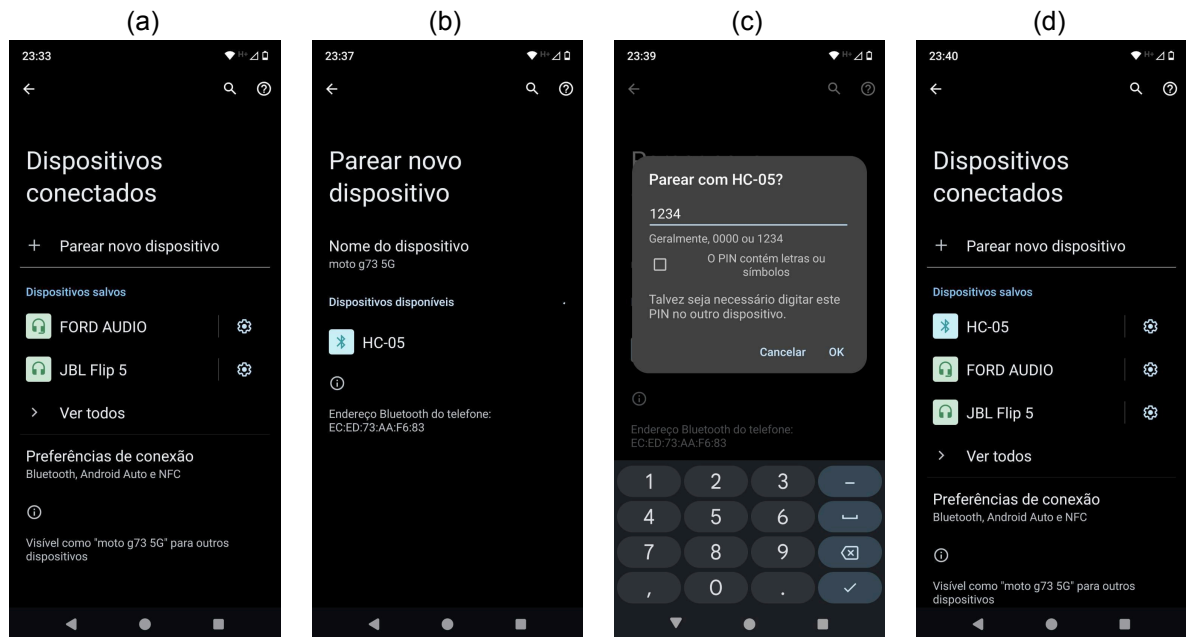
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 53 - *Bluetooth no smartphone android* (a) antes de ser habilitado (b) após ser habilitado.



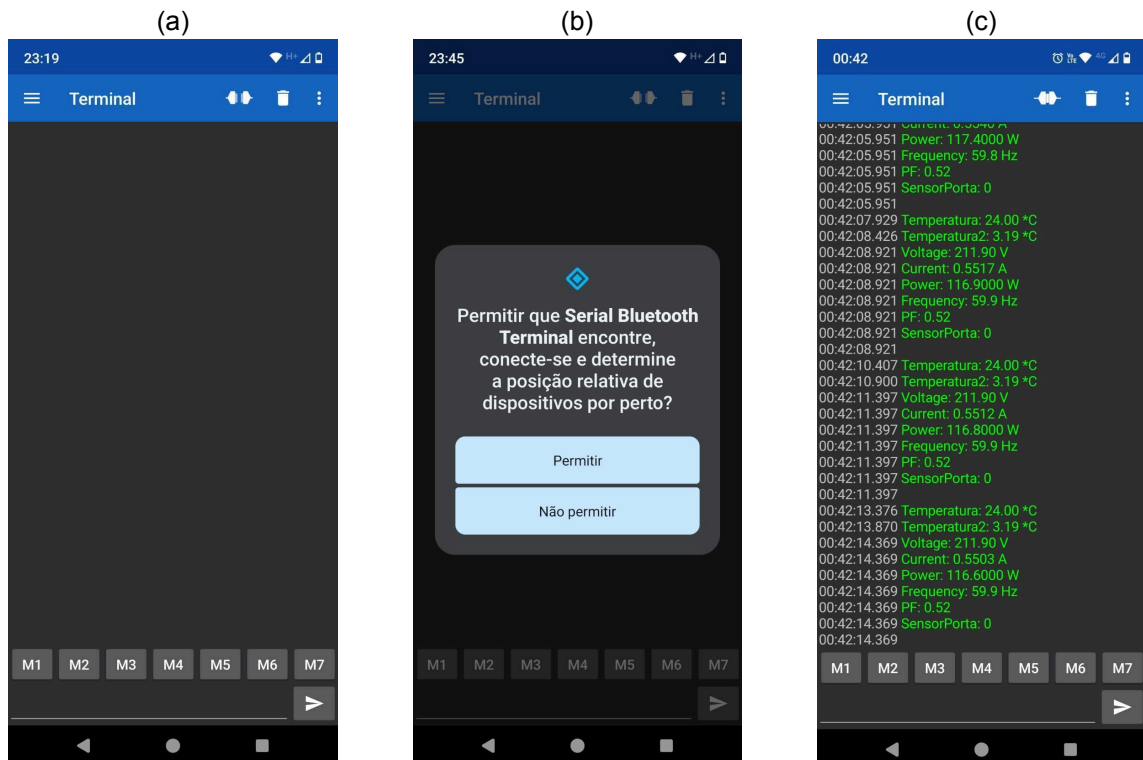
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 54 - Parear *hardware* com o *smartphone* (a) antes de ser pareado; (b) dispositivos disponíveis; (c) senha padrão do *bluetooth*; (d) após ser pareado.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 55 - Conexão do aplicativo *serial to bluetooth terminal* com o *hardware* (a) aplicativo antes de ser conectado; (b) permitir conexão com o dispositivo; (c) dados sendo recebidos do *hardware* para o aplicativo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

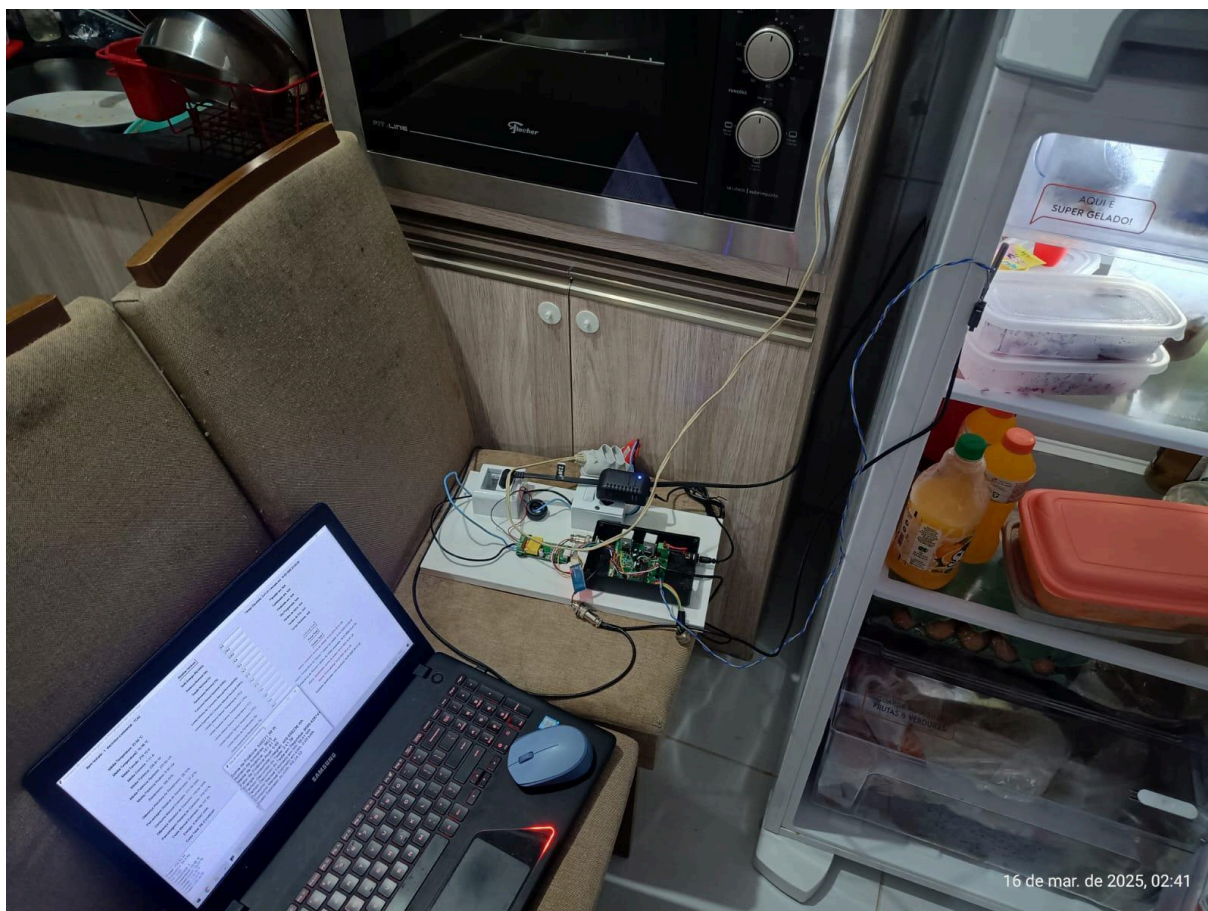
4.5 Testes do *software* com refrigerador cadastrado

Os testes a seguir foram feitos com o refrigerador cadastrado, cujo modelo é o TC44 como foi mostrado na Figura 41. O *setup* de testes é mostrado na Figura 56.

Após coletados os dados serão apresentados os gráficos das variáveis ao longo do tempo (tensão, corrente, potência ativa, fator de potência, temperatura ambiente, temperatura interna, sensor de porta e frequência), da energia acumulada e a tela de monitor de consumo energético. Serão discutidos os resultados para três diferentes perfis de usuários:

- a) Teste realizado por uma hora, não abrir a porta;
- b) Teste realizado por uma hora, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto;
- c) Teste realizado por uma hora, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos.

Figura 56 - *Setup* de Testes



Fonte: Elaboração própria (2025).

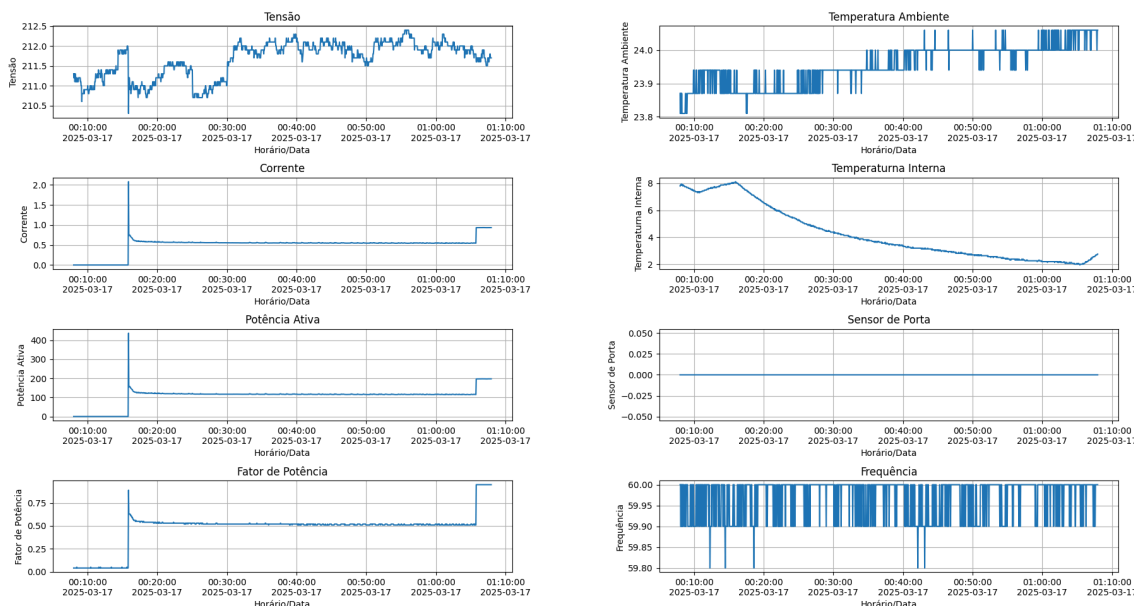
4.5.1 Teste realizado por uma hora, não abrir a porta

A corrente elétrica, a potência ativa e o fator de potência tiveram picos nos mesmos instantes de tempo e seguem o mesmo comportamento. O maior pico se dá pelo acionamento do compressor, a corrente elétrica chegou a aproximadamente 2,1 A, a potência ativa chegou a aproximadamente 437,0 W e o fator de potência chegou a aproximadamente 0,89. Em seguida os valores estabilizaram chegando em aproximadamente 0,70 A, 155,0 W e 0,63. Por fim, o refrigerador entrou em processo de degelo e os valores chegaram a aproximadamente 0,93 A, 197,0 W e 0,95. A temperatura interna iniciou em aproximadamente 8,00 °C e foi decrescendo ao longo do teste, e no final começou a aumentar no mesmo instante de tempo em que o refrigerador entrou em processo de degelo.

A tensão, a temperatura ambiente e a frequência não tiveram grandes variações e ficaram respectivamente entre 210,5 V até 212,5 V, entre 23,80 °C até 24,80 °C e entre 58,80 Hz e 60,00 Hz .

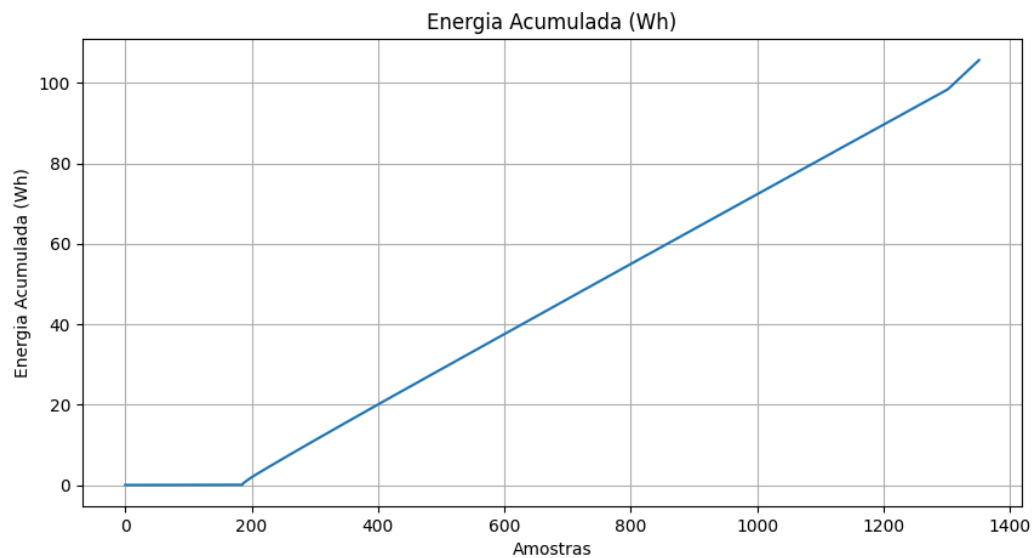
A energia acumulada durante o tempo de teste foi de 105,61 Wh num total de 1352 amostras.

Figura 57 - Gráficos das variáveis ao longo do tempo para uma hora de teste sem abrir a porta.



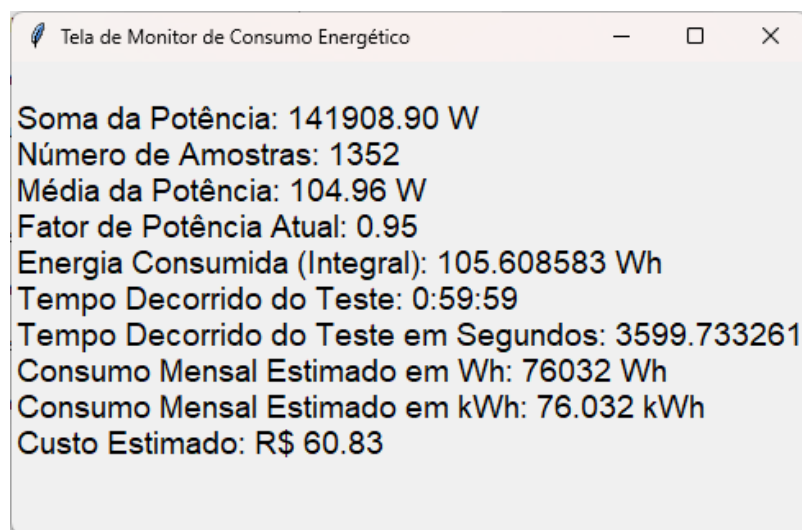
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 58 - Gráfico da energia acumulada x amostras para uma hora de teste sem abrir a porta.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 59 - Tela de Monitor de Consumo Energético para uma hora de teste sem abrir a porta.



Fonte: Elaboração própria (2025).

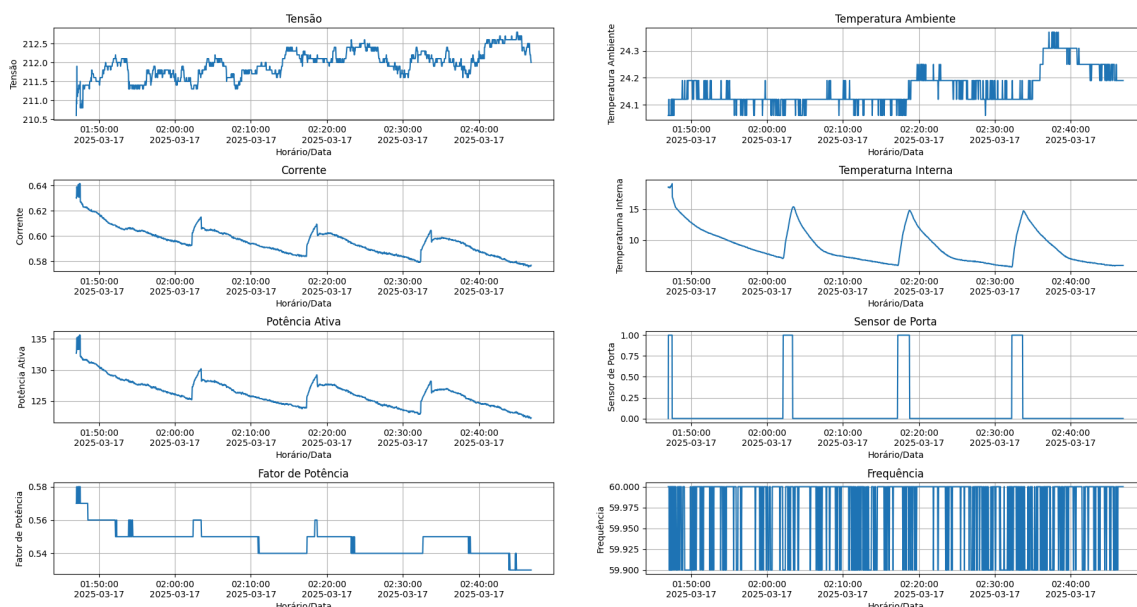
4.5.2 Teste realizado por uma hora, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto

A corrente elétrica, a potência ativa e o fator de potência tiveram oscilações sincronizadas ao longo do tempo e nos mesmos instantes de tempo e seguem o mesmo comportamento. No início do teste o valor da corrente elétrica teve o valor de aproximadamente 0,64 A, a potência ativa teve o valor de aproximadamente 135,0 W e o fator de potência teve o valor de 0,58. Em seguida os valores decresceram gradualmente chegando em aproximadamente 0,58 A, 125,0 W e 0,54. A temperatura interna iniciou em aproximadamente 16,0 °C e seu valor decresce até atingir por volta de 6,0 °C antes da primeira abertura da porta. Em seguida, a temperatura interna aumenta temporariamente e seu valor decresce até atingir 6,0 °C aproximadamente e, é esse padrão é mantido nos três registros de abertura de porta.

A tensão, a temperatura ambiente e a frequência não tiveram grandes variações e ficaram respectivamente entre 210,5 V até 212,5 V, entre 23,80 °C até 24,40 °C e entre 59,90 Hz e 60,00 Hz.

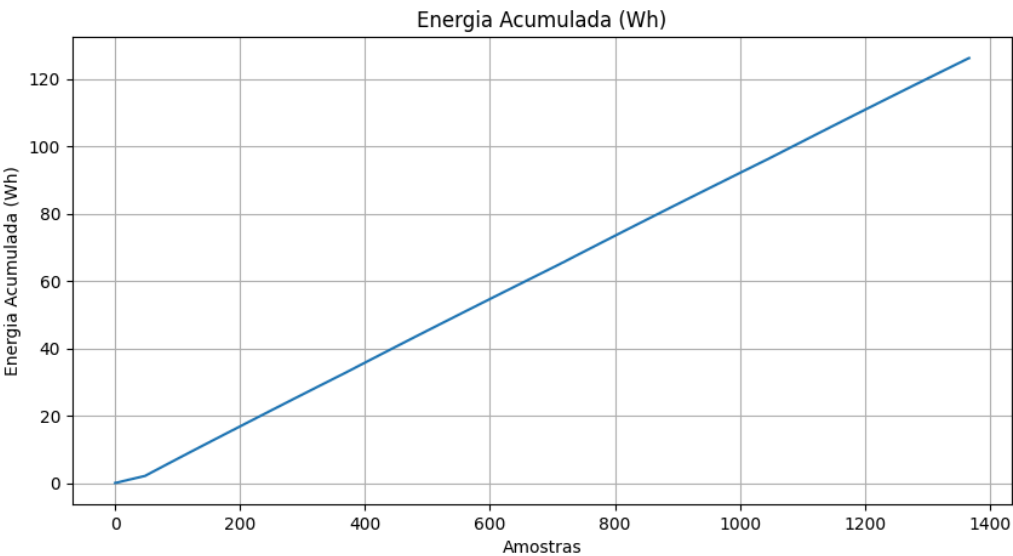
A energia acumulada durante o tempo de teste foi de 126,11 Wh num total de 1368 amostras.

Figura 60 - Gráficos das variáveis ao longo do tempo para uma hora de teste, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto.



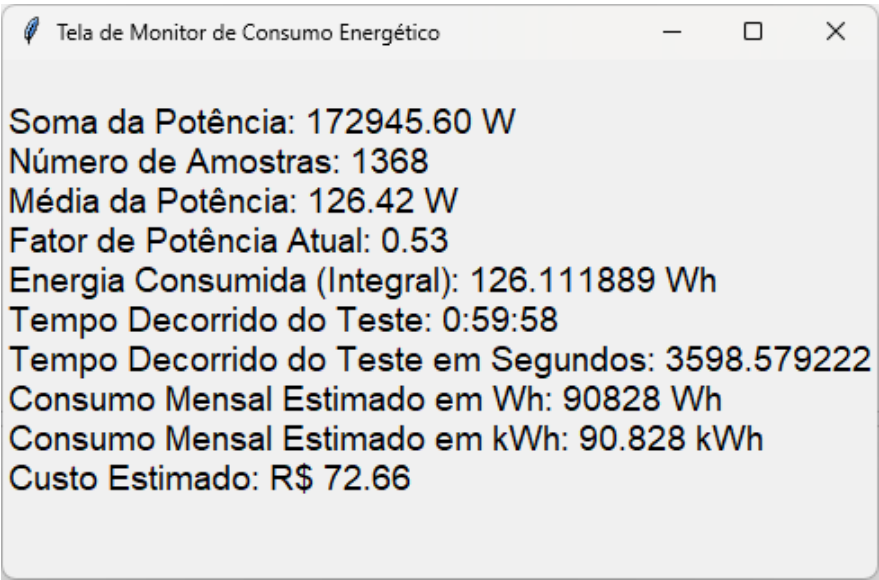
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 61 - Gráfico da energia acumulada x amostras para uma hora de teste, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 62 - Tela de Monitor de Consumo Energético para uma hora de teste, abrir a porta 3 vezes por 1 minuto.



Fonte: Elaboração própria (2025).

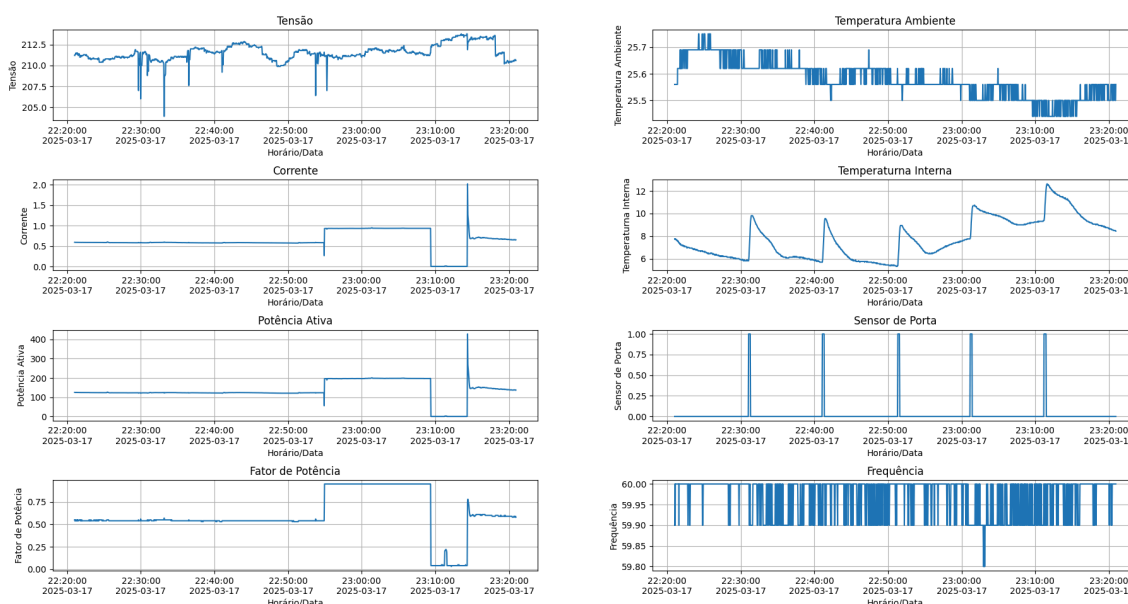
4.5.2 Teste realizado por uma hora, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos

A corrente elétrica, a potência ativa e o fator de potência tiveram oscilações sincronizadas ao longo do tempo e nos mesmos instantes de tempo e seguem o mesmo comportamento. No início do teste o valor da corrente elétrica teve o valor de aproximadamente 0,60 A, a potência ativa teve o valor de aproximadamente 120,0 W e o fator de potência teve o valor de 0,55, indicando que o compressor estava ligado. Quando o refrigerador entrou em processo de degelo os valores chegaram a aproximadamente 0,90 A, 200,0 W e 0,90. Em seguida os valores chegaram a aproximadamente 0,2 A, 1,00 W e 0,10, indicando que o compressor estava desligado e que o refrigerador não estava em processo de degelo. Por fim, o compressor voltou a ser ligado e os valores chegaram a aproximadamente 0,70 A, 130 W e 0,60.

A tensão, a temperatura ambiente e a frequência não tiveram grandes variações e ficaram respectivamente entre 205,0 V até 212,6 V, entre 25,00 °C até 25,80 °C e entre 59,80 Hz e 60,00 Hz.

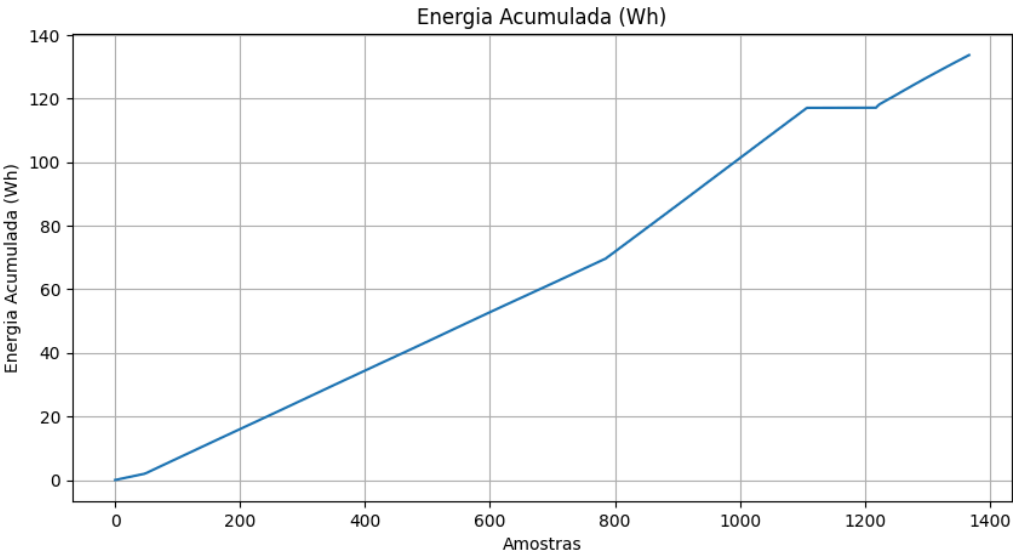
A energia acumulada durante o tempo de teste foi de 133,58 Wh num total de 1368 amostras.

Figura 63 - Gráficos das variáveis ao longo do tempo para uma hora de teste, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos.



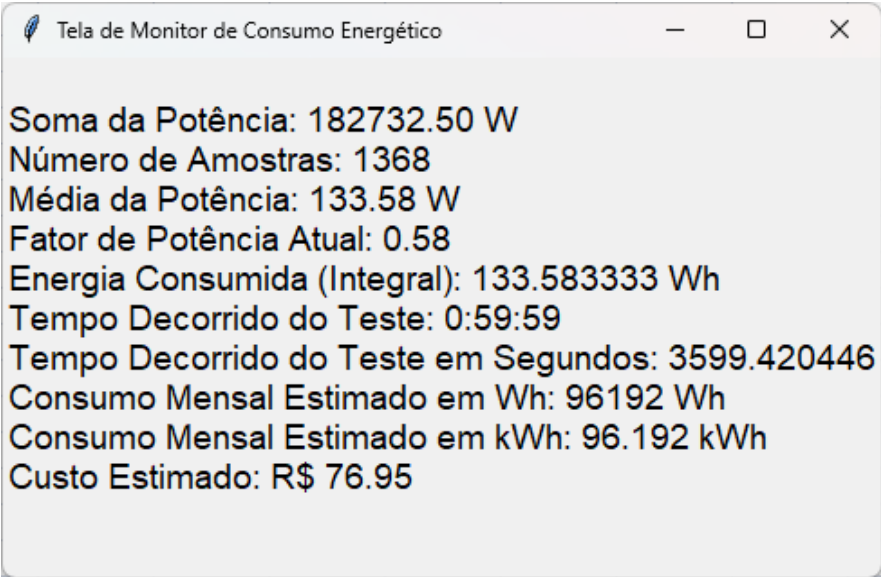
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 64 - Gráfico da energia acumulada x amostras para uma hora de teste, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 65 - Tela de Monitor de Consumo Energético para uma hora de teste, abrir a porta a cada 10 minutos por 10 segundos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.6 Considerações sobre os testes

Após a realização dos testes foi possível fazer as medições do consumo energético, da temperatura interna, e da temperatura ambiente e verificar a abertura e o fechamento da porta do refrigerador.

O *firmware* desenvolvido permitiu ao *hardware* coletar e processar os dados de tensão elétrica, corrente elétrica, potência ativa, frequência, fator de potência e do sinal do sensor de porta. O módulo *bluetooth* permitiu o envio dos dados para o *smartphone* via aplicativo *Serial Bluetooth Terminal* instalado, o que proporcionou mobilidade e praticidade na visualização dos dados.

O cabo PL2303HX permitiu a comunicação serial entre *hardware* e *software* via conexão USB. O *software* desenvolvido permitiu, na Tela do Analisador de Consumo Energético de Refrigeradores, receber e exibir os dados do microcontrolador, fazer cálculos de média móvel armazenados em uma lista com os 10 últimos valores (temperatura ambiente, temperatura interna, tensão elétrica, corrente elétrica, potência ativa, potência aparente, potência reativa, consumo mensal estimado, diferença absoluta do consumo, porcentagem relativa do consumo, custo mensal estimado, energia e custo total), configurar os parâmetros (tarifa de energia, potência nominal, tensão nominal, consumo mensal nominal e limites inferior e limites superior do consumo mensal nominal, da temperatura e dos sensores), exibir as variáveis temporais (tempo decorrido, data e horário de início de teste, tempo de pausa, de continuação, de finalização, data e horário de início, e tempo restante de teste personalizado), emitir alertas de transição de estados (alertas de consumo e de temperatura dos sensores abaixo, dentro ou acima da média e porta aberta ou porta fechada), gerar relatório de teste contendo as últimas informações dos dados de média móvel e da transição de estados. O *software* registrou os dados recebidos do *hardware* com o ID e a data e o horário de coleta para um arquivo (dados_arduino_indefinido.txt).

Na Tela de Monitor de Consumo Energético os dados (potência ativa, ID e fator de potência) foram extraídos do arquivo dados_arduino_indefinido.txt e foram utilizados para calcular a soma total de todas as potências, o número de amostras e a média das potências, que foram exibidas juntamente com o fator de potência. O *software* registrou em outro arquivo (dados_extraidos.xlsx) os dados de ID, de potência ativa de cada amostra, a data e o horário de coleta, a diferença de tempo

de cada coleta, a potência média, a energia calculada de cada amostra e a energia acumulada. A energia acumulada, o tempo decorrido de teste, o consumo mensal estimado e o custo estimado foram calculados e exibidos nessa tela.

Além do *software* foi desenvolvido um *script* que gera os gráficos ao longo do tempo das seguintes variáveis: tensão elétrica, corrente elétrica, potência ativa, fator de potência, temperatura ambiente, temperatura interna do refrigerador, sensor de porta frequência e energia acumulada. A partir dos gráficos gerados foi possível analisar o consumo energético ao longo do tempo para detectar tendências e padrões e verificar se a temperatura do refrigerador está dentro dos parâmetros aceitáveis e se ela influencia no consumo de energia.

Considerando os testes foi possível verificar pelos gráficos que a corrente elétrica, a potência ativa e o fator de potência são diretamente proporcionais porque tiveram oscilações sincronizadas ao longo do tempo e nos mesmos instantes de tempo. O gráfico da temperatura interna do refrigerador mostrou que o seu valor decresceu após o acionamento do compressor e cresceu após o processo de degelo a fim de manter a temperatura dentro de uma faixa desejada.

Para os testes com abertura e fechamento de porta a temperatura interna cresceu gradativamente enquanto a porta estava aberta e decresceu gradativamente enquanto estava fechada. Com relação ao consumo energético, a frequência de abertura de porta fez aumentar o consumo energético. Com o compressor ligado a potência ativa variou de 125 W até 155 W, e em processo de degelo a potência ativa ficou próximo dos 200 W. O refrigerador usado no teste tem uma potência nominal de 242 W e em degelo de 218 W.

A tensão elétrica, a frequência e a temperatura ambiente tiveram poucas variações durante a realização dos testes e não influenciaram significativamente nos resultados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de medição do consumo de energia elétrica de refrigeradores com capacidade de medição de energia, de temperatura e de abertura de porta. Para tanto, foi projetado um protótipo composto de um *hardware* e de um *software*. O *hardware* teve a função de processar os valores medidos pelos sensores e organizá-los numa estrutura de dados. O *software* teve a função de conectar-se ao *hardware* para coletar a sua estrutura de dados e fazer o processamento e cálculos para estimar o consumo e o custo da energia elétrica e emitir alertas de transição de estados de consumo, de temperatura e de abertura de porta.

Os testes realizados com o refrigerador mostraram que o consumo energético pode variar de acordo com a temperatura interna do refrigerador, com o período de funcionamento do compressor, com o período de processo de degelo e com a frequência da abertura da porta do refrigerador.

O *software* desenvolvido em *Python* permitiu a conexão com o *hardware* bem como coletar, processar, armazenar, registrar os dados, emitir alertas de transições de estados de consumo de energia elétrica, de temperatura e de abertura de porta.

O sensor de energia CA PZEM-004T-100A-V3.0 permitiu a medição de tensão, corrente, potência ativa, fator de potência e frequência, dois sensores de temperatura DS18B20 permitiram as medições da temperatura interna do refrigerador e da temperatura ambiente, além do sensor de abertura de porta que permitiu a verificação de abertura e fechamento da porta do refrigerador. A comunicação de dados com o computador foi feita via USB enquanto que a comunicação de dados com o *smartphone* foi feita utilizando o módulo *bluetooth* HC-05.

O protótipo pode ser melhorado, e projetado para ter memória interna para poder armazenar os dados em um SD Card, um relógio em tempo real (real-time-clock), um módulo ethernet para que seja possível enviar os dados para uma interface de programação de aplicação (API) via *internet*, um *display* para poder visualizar os dados, adicionar uma bateria ao sistema e criar um aplicativo de celular capaz de visualizar os dados dos sensores do *hardware* e gerar relatórios que indiquem necessidades de ações específicas.

REFERÊNCIAS

INMETRO. **Tabelas de Eficiência Energética: Refrigeradores, Frigobares, Combinados e Combinados Frost Free. Programa Brasileiro de Etiquetagem. 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/refrigeradores-frigobares-combinados-combinados-frost-free>. Acesso em: 08 de setembro. 2024.

DALLAS SEMICONDUCTOR. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer.** Disponível em: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>. Acesso em: 09 de setembro. 2024.

SADIKU, M. e ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de circuitos elétricos.** P. Alegre: Bookman, 2003.

INNOVATORS GURU. **PZEM-004T V3.0: Datasheet & User Manual.** [S.l]: Innovators Guru, 2019. Disponível em: <https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf>. Acesso em: 11 de outubro de 2024.

ROBOCORE. **Sensor de temperatura DS18B20 - À Prova de Água.** Disponível em: https://www.robocore.net/sensor-ambiente/sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-de-agua?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsJO4BhDoARIsADDv4vCiNICgmM4UHKWMshK7QMRbKmlrW85iZ96C7LdPnJcUzLeVckq8OrcaAgo_EALw_wcB. Acesso em: 27 de outubro de 2024.

PROLIFIC. **PL2303 Windows Driver Download USB to UART RS232 Serial.** Disponível em: https://www.prolific.com.tw/TW/ShowProduct.aspx?p_id=225&pcid=41. Acesso em: 23 de outubro de 2024.

ELETRODEX. **BC352239A – Datasheet do Módulo Bluetooth.** Disponível em: https://eletrodex.org/eletrodex/Loja_Tray/Datasheets/PlacasModulos/Modulos/Conectividade/BC352239A.pdf. Acesso em: 27 de outubro de 2024.

Arduino Uno - Medir Voltaje, Corriente, Potencia, Factor de Potencia AC con el modulo PZEM-004T. YouTube, publicado por *Proyectos con Arduino*, 29 de abril de 2020, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9uABv7tOh2s>. Acesso em 2 de novembro de 2024.

AUTOCORE. Chave Micro Switch KW11-3Z-5 3T. Disponível em: https://www.autocorerobotica.com.br/chave-micro-switch-kw11-3z-5-2t?srsId=AfmBOozGgBNDcBSTCIHJpGKKOri_7gzEvNUFe9tOjxOFw9aQ5JgllEA. Acesso em: 28 de outubro de 2024.

Construir um Medidor de Corrente com PZEM e NodeMCU e integra-lo com o Home Assistant. YouTube, publicado por César Brod, 14 de setembro de 2021, disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=79Kle_JpKfQ&t=723s. Acesso em 2 de novembro de 2024.

PEREIRA, FÁBIO. **Tecnologia ARM: microcontroladores de 32 bits.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2007.

WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos.** Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-d-e-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 12 de Março de 2025.

CELESC. **Glossário.** Disponível em: <https://www.celesc.com.br/glossario#.t>. Acesso em: 16 de Março de 2025.

FERNANDES, ELVIS. **Sistema de medição do consumo de energia elétrica de refrigeradores [repositório de códigos e deste documento].** Disponível em: <https://github.com/elvisfernandess/Sistema-de-medicao-do-consumo-de-energia-eletrica-de-refrigeradores>. Acesso em: 12 de Abril de 2025.

VENDRUSCULO, Edson Adriano; QUIROZ, Guilherme de Castilho; JANNUZZI, Gilberto De Martinho; POMILIO, José Antônio; BORGES, Thomaz. **Technical improvement of residential refrigerator in Brazil: energy efficiency analysis**, In Anais do EEDAL 2003, Torino, 2003, pp 1-7. <https://www.iei-brasil.org/pdf/reliei2560203-002.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

TIPLER, P. e MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros: volume 1.** 6 ed. P. Alegre: Bookman, 2009.

CARMEIS, Dean W. M. **Os efeitos da diversidade de tensões de distribuição no setor elétrico brasileiro. Estudo do Caso do Refrigerador Doméstico.** 2002. 132p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

IEC 62552:2007. **Household refrigerating appliances. Characteristics and test methods**. 2008. Disponível em:
<http://www.china-gauges.com/Uploads/download/57a15a1987232.pdf>. Acesso em
08 de setembro de 2024.

CELESC. **Tarifas e taxas de energia**. Disponível em:
<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia>. Acesso em 10 de abril de 2025.