Universidade de Brasília

Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE) - UnB Gama

Engenharia Eletrônica

Dispositivo Eletrônico para Adaptação de Geladeiras a Sistema de Energia Solar Fotovoltaico Dedicado

Alisson Ferreira da Silva

Gilberto Gonçalves Pereira

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENGENHARIA ELETRÔNICA

Brasília

2025

Universidade de Brasília
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE) - UnB Gama
Engenharia Eletrônica

Dispositivo Eletrônico para Adaptação de Geladeiras a Sistema de Energia Solar Fotovoltaico Dedicado

Alisson Ferreira da Silva
Gilberto Gonçalves Pereira

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Rudi Henri Van Els

Brasília
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Ferreira da Silva, Alisson.
Dispositivo Eletrônico para Adaptação de Geladeiras a Sistema de Energia Solar Fotovoltaico Dedicado / Alisson Ferreira da Silva; Gilberto Gonçalves Pereira; orientador Rudi Henri Van Els . -- Brasília, 2025.
101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica) -- Universidade de Brasília, 2025.

1. Produção. 2. Conversão ou distribuição de energia elétrica. 3. Energia solar fotovoltaica. 4. Conversor de frequência. I. Gonçalves Pereira, Gilberto. II. , Rudi Henri Van Els, orient. III. Título.

Universidade de Brasília
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE) - UnB Gama
Engenharia Eletrônica

Dispositivo Eletrônico para Adaptação de Geladeiras a Sistema de Energia Solar Fotovoltaico Dedicado

Alisson Ferreira da Silva
Gilberto Gonçalves Pereira

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, 20 de fevereiro de 2025:

Prof. Dr. Rudi Henri Van Els,
UnB/FCTE/UnB GAMA
Orientador

Prof. Dr. Alex Reis,
UnB/FCTE/UnB GAMA
Convidado 1

Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda,
UnB/FCTE/UnB GAMA
Convidado 2

À toda minha família, amigos e professores, e em especial ao meu pai, Antonio Ferreira da Silva que muito contribuiu para que escolhesse a eletrônica como profissão. E também dedico às crianças adultas que, quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

Alisson Ferreira da Silva

Dedico este projeto a todos os professores que me influenciaram na minha trajetória. Em especial a todo corpo docente da UnB Gama com quem compartilhei minhas dúvidas e angústias a respeito do tema.

Gilberto Gonçalves Pereira

Agradecimentos

Ao nosso orientador, aos professores que contribuíram para o nosso aprendizado. À Universidade de Brasília pela oportunidade de estudo de qualidade. Aos amigos e todos que contribuíram direto ou indiretamente para conclusão deste projeto.

Alisson Ferreira da Silva

Ao meu orientador pelo incentivo constante e pelas sugestões enriquecedoras que moldaram não apenas este trabalho, mas também minha visão como estudante e pesquisador.

Gilberto Gonçalves Pereira

“Pois Deus amou de tal forma o mundo, que entregou o seu Filho único, para que todo o que nele acredita não morra, mas tenha a vida eterna.”
(João 3:16)

Resumo

A conservação de alimentos e medicamentos em regiões remotas, sem acesso à rede elétrica, é um desafio significativo. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico de baixo custo e baixa potência, capaz de operar geladeiras ou freezers domésticos utilizando energia solar. O sistema fotovoltaico dedicado, sem a necessidade de baterias, visa a produção e armazenamento de frio por meio de gelo, garantindo a preservação de bens essenciais mesmo em períodos sem luz solar.

A revisão de literatura explora as tecnologias existentes de refrigeração solar, destacando as soluções de ciclo de compressão e absorção, bem como as limitações associadas ao uso de baterias em sistemas *off-grid*. São analisadas as tecnologias de compressores, incluindo motores monofásicos e bifásicos com capacitores de partida.

A metodologia detalha o projeto do sistema, desde a seleção dos componentes, como painéis solares, inversores e microcontroladores, até a implementação do circuito de controle e estratégias de armazenamento de frio.

Este projeto tem potencial para melhorar significativamente a qualidade de vida em comunidades isoladas, fornecendo uma solução sustentável e eficiente para a conservação de alimentos e medicamentos.

Palavras-chave: produção; conversão ou distribuição de energia elétrica; energia solar fotovoltaica; conversor de frequência.

Abstract

The preservation of food and medicines in remote regions without access to the electrical grid is a significant challenge. This work proposes the development of a low-cost, low-power electronic device capable of operating domestic refrigerators or freezers using solar energy. The dedicated photovoltaic system, without the need for batteries, aims to produce and store cold through ice, ensuring the preservation of essential goods even in periods without sunlight.

The literature review explores existing solar refrigeration technologies, highlighting compression and absorption cycle solutions, as well as the limitations associated with the use of batteries in *off-grid* systems. Compressor technologies are analyzed, including single-phase and two-phase motors with starting capacitors.

The methodology details the design of the system, from the selection of components, such as solar panels, inverters and microcontrollers, to the implementation of the control circuit and cold storage strategies.

This project has the potential to significantly improve the quality of life in isolated communities by providing a sustainable and efficient solution for the preservation of food and medicines.

Keywords: production; conversion or distribution of electrical energy; photovoltaic solar energy; frequency converter.

Lista de figuras

Figura 1.1 Indisponibilidade da rede elétrica (IBGE, 2010). 18
Figura 1.2 Média anual de irradiação (kWh/m².dia) (PEREIRA et al., 2017). 18
Figura 2.1 Funcionamento refrigerador doméstico. Fonte: htpp://www.omundodaquimica.com.br 23
Figura 2.2 Diagrama geral do sistema de resfriamento e conservação do leite (a); vista transversal dos circuitos de refrigeração (b). Fonte: De Blas – 2003. 24
Figura 2.3 Compressor de bebedouro de água elétrico, detalhe vista interior após corte da carcaça. Fonte: Autores. 25
Figura 2.4 MotorBifasico. Fonte: Autores. 27
Figura 2.5 Vista esquemática de um motor de indução monofásico. (Fonte: Fitzgerald - Máquinas Elétricas) 29
Figura 2.6 Motor de fase dividida (motor de indução monofásico): (a) conexões, (b) diagrama fasorial na partida e (c) característica típica de conjugado(torque) versus velocidade. (Fonte: Fitzgerald - Máquinas Elétricas)) 30
Figura 2.7 Motor com partida a capacitor: (a) conexões, (b) diagrama fasorial na partida e (c) característica típica de conjugado(torque) versus velocidade. (Fonte: Fitzgerald - Máquinas Elétricas) 30
Figura 2.8 Diagrama esquemático da energia solar Fonte: https://luzsolar.com.br . 33
Figura 2.9 Curva Tensão-Corrente PV Fonte: https://lglsolar.com.br 33
Figura 2.10 Conversor Boost Fonte: https://eletronicadepotencia.com/conversor-boost-mcc/ 35
Figura 2.11 Conversor Meia-Ponte Fonte: https://eletricidadesemsegredo.com . . . 36
Figura 2.12 Diagrama geral do sistema de resfriamento e conservação do leite (a); vista transversal dos circuitos de refrigeração (b). Fonte: De Blas – 2003. 39
Figura 2.13 Velocidade do motor (rpm) plotada em função da corrente para diferentes tensões, de acordo com o teste de carga. Fonte: De Blas – 2003. 40
Figura 2.14 Configuração da máquina de gelo. Diagrama de blocos (a); os circuitos de resfriamento (b). Fonte: Axaopoulos - 2009. 40
Figura 2.15 Operação com compressor único (a); operação com múltiplos compressores (b). Fonte: Axaopoulos - 2009. 41
Figura 2.16 Consumo de corrente em um dia ensolarado. Fonte: Pedersen – 2004. . 41
Figura 3.1 Diagrama de blocos. Fonte: Pedido de patente BR 202022006924-2 U2 (2012) 43
Figura 3.2 Diagrama de blocos STM32g491re. Fonte:(STMicroelectronics, 2024b) . 46
Figura 3.3 Algumas janelas do STMCubeIDE. Fonte: STMicroelectronics, adaptado 48

Figura 3.4 Circuito Equivalente interno e pinos de entrada e saída. Fonte: Datasheet FSBB20CH60C, adaptado. 49
Figura 3.5 Fluxo pretendido para o projeto. Fonte: Autores. 50
Figura 4.1 Habilitação do cristal que será usado como clock. Fonte: Autores. 52
Figura 4.2 Configuração de clock para o microcontrolador NUCLEO-G941RE. Fonte: Autores. 53
Figura 4.3 Habilitação dos três canais PWM e seus complementares. Fonte: Autores. 53
Figura 4.4 Configuração da frequência do PWM. Fonte: Autores. 54
Figura 4.5 Configuração do duty cicle para cada pulso PWM. Fonte: Autores. . . . 55
Figura 4.6 Configuração do Dead Time. Fonte: Autores. 56
Figura 4.7 Inicializar os PWM para cada canal. Fonte: Autores. 56
Figura 4.8 Sinais PWM gerados pelo microcontrolador: a) Canal 1 e seu complementar; b) Canal 2 e seu complementar; e o c) Canal 3 e seu complementar. Fonte: Autores. 57
Figura 4.9 Sinal PWM com frequência de 10KHz e dead time de 1us. Fonte: Autores. 57
Figura 4.10 Código que gera o sinal SPWM. Fonte: Autores. 58
Figura 4.11 Sinais PWM gerados pelo microcontrolador após filtro RC: a) Canal 1 e seu complementar; b) Canal 2 e seu complementar; e o c) Canal 3 e seu complementar. Fonte: Autores. 59
Figura 4.12 Sinal SPWM do canal 1 e canal 2. Fonte Autores. 59
Figura 4.13 Montagem do sistema com potenciômetro pra ajuste manual da frequência. Fonte: Autores. 60
Figura 4.14 Montagem do sistema com divisor de tensão substituindo o potenciômetro. Fonte: Autores. 60
Figura 4.15 Configuração das bobinas do motor utilizado. Fio preto referência, fio branco -90º de defasagem e fio marrom 90º de defasagem. Fonte: Autores. 61
Figura 4.16 SPCIT 1000-80-20 Módulo Inversor 3 Braços (10 kVA, 800 V, 20 kHz). Fonte: SUPPLIER 61
Figura 4.17 Capacidade de corrente de saída em função da frequência de comutação e da tensão de barramento. Fonte: SUPPLIER 62
Figura 4.18 Identificação dos elementos do conjunto. Fonte: SUPPLIER 63
Figura 4.19 Conector IDCSC-24. Fonte: SUPPLIER 64
Figura 4.20 Conector PCMC2-03. Fonte: SUPPLIER 65
Figura 4.21 Esquema inversor SPCIT 1000-80-20 a). Fonte: Autores. 66
Figura 4.22 Associação dos pinos de saída do MCU STM32G491RE b) com o inversor SPCIT a). Fonte: Autores. 66
Figura 4.23 Diagrama em bloco ensaio 1. Fonte: Autores. 67
Figura 4.24 Diagrama em bloco ensaio 2. Fonte: Autores 67
Figura 4.25 Diagrama em bloco ensaio 3. Fonte: Autores. 68

Figura 4.26 Diagrama em bloco ensaio 4 (motor compressor de geladeira). Fonte: Autores. 68
Figura 4.27 Módulo Adaptador de Níveis de Tensão – 3,3V para 15V. Fonte: Projeto de Iniciação Científica – Aluno Marcelo Rodrigues da S. Brito. 69
Figura 4.28 Diagrama bloco do Kit de desenvolvimento. Fonte: Autores. 70
Figura 4.29 Kit de desenvolvimento. Fonte: Autores. 70
Figura 4.30 Montagem inicial dos ensaios. Fonte: Autores. 71
Figura 4.31 Segundo ensaio usando motor trifásico como carga. Fonte: Autores . . . 71
Figura 4.32 Motor WEG 11409761 (a) e (b). Fonte: Autores. 72
Figura 4.33 Diagrama das medições feita no motor WEG 11409761. Fonte: Autores. 72
Figura 4.34 Reconfiguração das fases 1, 2 e 3 no código do microcontrolador STM32G491RE. Fonte: Autores. 72
Figura 4.35 Compressor de bebedouro de água elétrico. Fonte: Autores. 73
Figura 4.36 Programação para leitura do potenciômetro/divisor de tensão. Fonte: Autores. 73
Figura 4.37 Progamação para leitura da frequência dos pulsos SPWM. Fonte: Autores. 73
Figura 4.38 Medida do tempo de execução do loop principal do código. Fonte: Autores. 74
Figura 4.39 Exemplo de aplicação usando CI FSBB20CH60C. Fonte: ONSEMI. . . . 75
Figura 4.40 Esquemático inversor CI FSBB20CH60C. Fonte: Autores. 75
Figura 4.41 Diagrama PCB geladeira solar. Fonte: Autores. 76
Figura 4.42 Placa vista 3D Geladeira solar. Fonte: Autores. 76
Figura 4.43 Placa inversora Geladeira solar (SOLOGEL). Fonte: Autores. 77
Figura 4.44 Sistema completo com a placa do circuito inversor desenvolvida durante o projeto. Fonte: Autores. 78

Lista de tabelas

Tabela 4.1 Dados técnicos conjunto SPCIT 1000-80-20 62
Tabela 5.1 Lista de Materias (BOM) 80

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	Analogue-Digital Converter
ACIM	Alternate Current Induction Motor
BLDC	Brushless DC Motor
BOM	Bill of Materials
CC/CA	Corrente contínua e corrente alternada
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COP	Coeficiente de Performance
COPabs	Coeficiente de Performance absoluto
DC	Duty Cycle
DBC	Direct Bonded Copper
FOC	Field Oriented Control
FPU	Floating Point Unit
FV	Sistemas solares fotovoltaicos
HVIC	High Voltage Integrated Circuit
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICs	Integrated Circuits
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPM	Integrated Pest Management
LED	Light-Emitting Diode
LSTTL	Low-Power Schottky Transistor Transistor Logic
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MSPS	Mega Samples Per Second
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor

PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square
SC	Short Circuit
STM32	Microcontrolador de 32 bits da STMicroelectronics
SPM	Smart Power Module
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
UV	UnderVoltage
VA	Volt-Amperes
I	Corrente, em ampères [A]
P	Potência ativa em watts [W]
PCMs	Phase Change Materials
Q	Potência reativa, em volt-amperes reativos [VAR]
V	Tensão, em volts [V]

Sumário

1 Introdução 17

1.1 Objetivos do Trabalho 19

1.1.1 Objetivos Gerais 19

1.1.2 Objetivos Específicos 19

1.1.3 Justificativa 19

1.1.4 Estrutura do Trabalho 20

2 Revisão Bibliográfica 21

2.1 Geladeiras 21

2.1.1 Refrigeração por Absorção 21

2.1.2 Refrigeração por Compressão 22

2.1.3 Funcionamento de Geladeiras Convencionais que Trabalham por Compressão 22

2.1.4 Compressores e Motores 25

2.2 Desenvolvimento do sistema de controle para motores de indução bifásicos 26

2.3 Motores de Indução Bifásicos 27

2.4 Métodos de Controle para Inversores de Frequência 28

2.5 Sistema de Partido de Motores para Geladeiras 28

2.5.1 Partida de Motor com Capacitor 30

2.5.2 Partida Suave do Motor 31

2.6 Componentes de um Sistema Fotovoltaico 32

2.6.1 Painéis Solares 32

2.6.2 Conversores CC/CC 34

2.6.3 Inversores e Controle de Motores 37

2.7 Soluções de Refrigeração com Energia Solar Desenvolvidas 37

2.7.1 Refrigerador com PV Sem Bateria 37

2.7.2 Sistema de Fabricação de Gelo Sem Baterias 38

2.7.3 Sistema de Refrigeração de Leite com Energia Solar 38

2.7.4 Máquina de Gelo com PV Sem Baterias 38

2.7.5 Motor de Corrente Continua 39

2.8 Conclusão da Revisão Bibliográfica 42

3 Proposta da Geladeira 43

3.1 A Geladeira Solar 43

3.2 Funcionamento do Equipamento 44

3.3 Microcontrolador para Implementar o Produto 44

3.4 Interface de desenvolvimento STM32CubeIDE 46
3.5 Módulo Inversor CI FSBB20CH60C 48
3.6 Fluxo para sistema de controle do projeto 49

4 Bancada Experimental 51
4.1 Montagem Experimental 51
4.2 Configuração do STM32, NUCLEO-G491RE 52
4.2.1 Configuração do Clock 52
4.2.2 Configuração do Timer 53
4.2.3 Configuração da Frequência do PWM 54
4.2.4 Configuração do Duty Cycle 54
4.2.5 Configuração do Dead Time 55
4.3 Implementação do código principal 56
4.4 Geração da Onda Senoidal Modulada (SPWM) 58
4.5 Controle de Frequência e Tensão 59
4.6 Configuração do Motor 60
4.7 Testes iniciais com o microcontrolador STM32G491RE e carga. 61
4.7.1 Drivers DRO100D25A 65
4.7.2 IGBTs 65
4.7.3 Capacitores de barramento 65
4.8 Resultados Obtidos 74
4.9 Comportamento do Motor 74
4.10 Desenvolvimento do circuito inversor de frequência usando CI FSBB20CH60C 74

5 Conclusões 79
5.1 Planilha de custos do projeto 80
5.2 Dificuldades Encontradas 81
5.3 Trabalhos Futuros 81
5.4 Considerações Finais 81

Referências 82

Apêndices 85

Apêndice A Código firmware para o STM32G491RE 86
A.1 Código final implentado para o STM32G491RE 86

Anexos 99

Anexo A Características Técnicas NUCLEO-STM32G491RE 100

1 Introdução

A refrigeração doméstica é indispensável para a preservação de alimentos e medicamentos, principalmente em regiões remotas ou comunidades isoladas, onde o acesso à energia elétrica é limitado ou inexistente. De acordo com o Censo de 2010 do IBGE, mais de 700 mil residências no Brasil não estavam conectadas à rede elétrica convencional. Além disso, mesmo em áreas onde a eletricidade está disponível, o alto custo pode tornar inviável o uso contínuo de geladeiras para muitas famílias. Nessas condições, surge a necessidade de soluções eficientes e acessíveis que possibilitem a conservação adequada de alimentos e medicamentos sem a dependência direta da rede elétrica.

As soluções atualmente disponíveis para essas regiões frequentemente envolvem sistemas fotovoltaicos off-grid com o uso de baterias para armazenamento de energia. Embora funcionais, essas baterias aumentam consideravelmente o custo e a complexidade do sistema, além de exigir manutenção frequente e ter uma vida útil limitada. Dessa forma, é evidente a necessidade de alternativas mais econômicas e com menor demanda de manutenção.

Uma alternativa promissora é a utilização de sistemas fotovoltaicos dedicados, projetados especificamente para acionar geladeiras sem o uso de baterias. Nesse tipo de solução, a energia solar é aproveitada durante o dia para a formação de gelo, que, por sua vez, mantém os alimentos resfriados à noite. A proposta deste trabalho visa implementar um dispositivo eletrônico de baixo custo que permite a operação de geladeiras comuns a partir de energia solar, otimizando a eficiência energética e eliminando a necessidade de baterias.

Essa ideia foi patenteada pela Universidade de Brasília (UnB), e este trabalho se concentra no desenvolvimento do produto, buscando transformar o conceito patenteado em uma solução prática e viável para o mercado. A inovação se baseia em um sistema eficiente de controle que substitui o capacitor de partida dos motores tradicionais por um sistema de partida suave, controlado por PWM (Modulação por Largura de Pulso). Essa tecnologia reduz os custos operacionais e contribui para o aumento da durabilidade dos inversores e motores, tornando o sistema mais eficiente e confiável.

A combinação entre a alta disponibilidade de energia solar em muitas regiões do Brasil e a falta de infraestrutura elétrica nessas áreas torna a energia solar uma solução viável e sustentável para a refrigeração. Neste contexto, a implementação de geladeiras alimentadas exclusivamente por sistemas fotovoltaicos dedicados oferece uma alternativa promissora para a conservação de alimentos e medicamentos, sem depender da rede elétrica convencional e com menores custos operacionais.

Além disso, a dependência de baterias nos sistemas tradicionais de energia solar é um desafio significativo. As baterias aumentam o custo total do sistema e sua manutenção pode

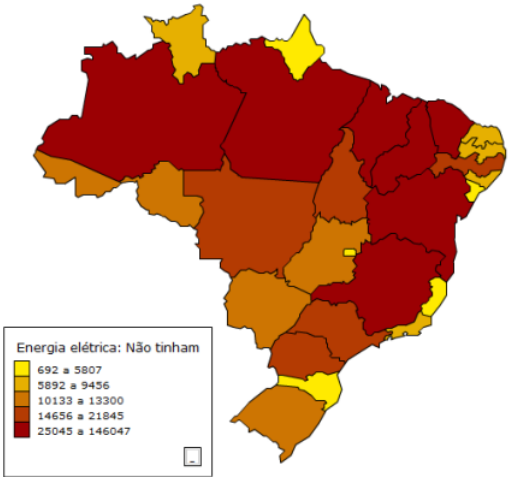


Figura 1.1 – Indisponibilidade da rede elétrica (IBGE, 2010).

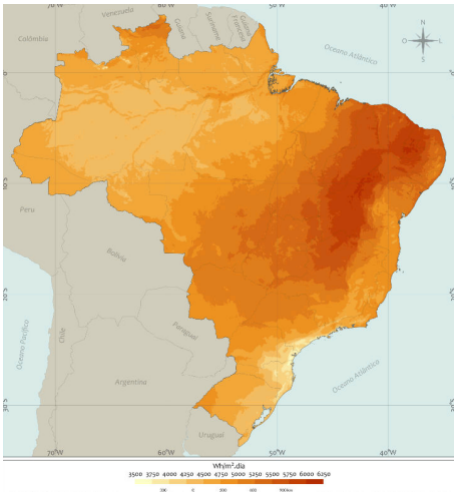


Figura 1.2 – Média anual de irradiação (kWh/m².dia) (PEREIRA et al., 2017).

ser um entrave para sua utilização em larga escala. O pico de corrente na partida dos motores de geladeiras convencionais é outro obstáculo, pois requer inversores de maior capacidade, elevando os custos e diminuindo a vida útil dos componentes. A solução apresentada neste trabalho, ao substituir o método tradicional de partida por uma partida suave controlada por PWM, oferece uma alternativa de maior eficiência energética e menor impacto financeiro.

Assim, este trabalho contribui com uma proposta inovadora que visa a otimização da energia solar para aplicações de refrigeração, proporcionando uma solução sustentável e economicamente viável para comunidades isoladas ou em regiões com infraestrutura elétrica limitada.

1.1 Objetivos do Trabalho

1.1.1 Objetivos Gerais

- Projetar um sistema de acionamento de motor de compressor de geladeira alimentado com painéis solares fotovoltaicos , permitindo a sua operação sem a necessidade de armazenamento de energia através do uso de bancos de baterias.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema de acionamento que integre painéis solares, uma ponte inversora com IGBTs e um microcontrolador STM32 para a operação eficiente da refrigeração, substituindo o capacitor de partida dos motores por uma partida suave controlada por PWM.
- Implementar uma estratégia de armazenamento de frio que permita a manutenção da temperatura durante a ausência de luz solar.
- Avaliar o desempenho do sistema em diferentes condições e realizar uma análise de custo-benefício para determinar a viabilidade econômica e técnica da solução proposta.

1.1.3 Justificativa

A refrigeração é uma necessidade básica em muitos lares e indústrias, especialmente para a preservação de alimentos e medicamentos. No entanto, em áreas remotas ou com infraestrutura de rede elétrica limitada, o uso de energia solar para alimentar geladeiras convencionais enfrenta desafios devido à necessidade de baterias para armazenar energia, e os custos para manutenção dessas baterias se torna um tanto elevado, pois devido à alta corrente de partida dos motores de geladeira acabam reduzido a vida útil das baterias e dos painéis solar.

Este projeto visa resolver esse problema, onde desenvolvemos uma placa com apenas um chip inversor de frequência sendo comandado por um microcontrolador eficiente projetado para acionamento de motores de indução, eliminando o uso de baterias, onde utiliza a energia solar diretamente para alimentar os motor-compressores de geladeiras convencionais, armazenando energia térmica na forma de gelo. O microcontrolador que será usado nesse projeto utiliza-se de pulsos PWM devidamente configurados fazendo com que os motor-compressores funcionem com uma corrente de partida suave, sem necessidade de qualquer relé ou capacitor de partida, fazendo com que reduza o consumo de energia e prolonga a vida útil dos motores. Isso torna o sistema uma alternativa viável e mais econômica para regiões onde o uso de baterias não é sustentável a longo prazo.

1.1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a apresentar a fundamentação teórica, o desenvolvimento do projeto e os resultados obtidos.

- **Capítulo 1: Introdução**: Apresenta a motivação para o desenvolvimento do projeto, os objetivos gerais e específicos, a justificativa para a pesquisa e a relevância da proposta para comunidades isoladas ou com acesso limitado à eletricidade.
- **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica**: Aborda conceitos fundamentais sobre sistemas de refrigeração, funcionamento de geladeiras convencionais, motores e compressores, além de explorar as tecnologias de energia solar fotovoltaica, inversores e métodos de acionamento de motores. Também apresenta estudos e soluções similares já desenvolvidas na literatura.
- **Capítulo 3: Desenvolvimento da Proposta**: Descreve a concepção e o funcionamento do sistema fotovoltaico proposto para alimentação de geladeiras sem o uso de baterias. São detalhados os componentes do sistema, o microcontrolador utilizado e a metodologia de acionamento do compressor via inversor de frequência.
- **Capítulo 4: Bancada Experimental e Testes**: Apresenta a montagem do protótipo, a configuração dos dispositivos eletrônicos e os ensaios realizados para validar o desempenho do sistema. São discutidos os parâmetros medidos, como eficiência energética, estabilidade da operação e análise de desempenho do compressor.
- **Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros**: Resume os principais resultados alcançados, destacando as contribuições do projeto e suas aplicações potenciais. Além disso, são sugeridas melhorias e possíveis desdobramentos para pesquisas futuras.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo revisar a literatura existente relacionada ao desenvolvimento de sistemas que integram geladeiras, compressores, motores, acionamento de motores, painéis fotovoltaicos, conversores e inversores, com foco em soluções sustentáveis e de baixo custo. Além disso, serão apresentados projetos semelhantes desenvolvidos por outros autores, destacando as principais contribuições e desafios enfrentados.

2.1 Geladeiras

As geladeiras convencionais são amplamente utilizadas em residências, comércios e indústrias para a conservação de alimentos, medicamentos e outros produtos que exigem controle de temperatura (Silva; Outros, 2010).

Existem diversos tipos de geladeiras, que podem ser classificados com base em diferentes tecnologias de refrigeração. As duas principais são a **refrigeração por absorção** e a **refrigeração por compressão**, que são amplamente utilizadas tanto em aplicações domésticas quanto comerciais (Costa, 2012). A seguir, será apresentada uma visão geral dessas tecnologias.

2.1.1 Refrigeração por Absorção

A refrigeração por absorção utiliza uma fonte de calor, que pode ser a energia solar térmica, para mover o fluido refrigerante sem a necessidade de eletricidade. O sistemas de absorção apresentam eficiências mais baixas quando comparados aos sistemas de compressão de vapor, além de exigirem mais espaço físico para a instalação dos componentes, como os coletores solares térmicos (Johnson, 2005).

O ciclo básico de refrigeração por absorção pode ser descrito da seguinte maneira (Smith, 2014):

- No gerador, a solução refrigerante-absorvente é aquecida, separando o refrigerante do absorvente.
- O refrigerante vaporizado é conduzido ao condensador, onde é resfriado e transformado em líquido, liberando calor para o ambiente.
- O refrigerante líquido passa por uma válvula de expansão, diminuindo sua pressão e temperatura, antes de chegar ao evaporador, onde ele absorve o calor do ambiente a ser refrigerado e evapora.
- O refrigerante evaporado é então reabsorvido pela solução no absorvedor, reiniciando o ciclo.

A eficiência do ciclo de absorção pode ser avaliada pelo Coeficiente de Performance (COP) da máquina de absorção (Miller, 2010):

$$\text{COP}_{abs} = \frac{T_e}{T_e - T_h} \tag{2.1}$$

Para $T_e = 273\,\text{K}$ e $T_h = 313\,\text{K}$:

$$\text{COP}_{abs} = \frac{273}{313 - 273} = 9.1 \tag{2.2}$$

A refrigeração por absorção é amplamente utilizada em situações onde há disponibilidade de fontes de calor de baixo custo, como energia solar ou calor residual, tornando-a uma solução atrativa para áreas sem eletricidade (Rodriguez, 2008).

2.1.2 Refrigeração por Compressão

A refrigeração por compressão é o método mais comum utilizado em geladeiras domésticas e comerciais. Seu princípio de funcionamento é baseado no ciclo de compressão de vapor, que utiliza um refrigerante em fase gasosa e líquida para transferir calor do interior da geladeira para o ambiente externo, conforme detalhado na Seção 1.3 (Andrews, 2011).

Este sistema, mais eficiente que a refrigeração por absorção, usa um compressor mecânico para realizar o trabalho de compressão do refrigerante, o que aumenta sua pressão e temperatura, permitindo o processo de condensação e subsequente evaporação para remover calor do compartimento interno da geladeira (Lee, 2007).

2.1.3 Funcionamento de Geladeiras Convencionais que Trabalham por Compressão

A refrigeração por compressão é o método mais utilizado em geladeiras modernas, tanto em aplicações domésticas quanto comerciais. Seu princípio de funcionamento baseia-se no ciclo de compressão de vapor, onde um refrigerante é utilizado para transferir calor do interior do refrigerador para o ambiente externo, promovendo a queda da temperatura interna (Davis, 2012).

As geladeiras convencionais geralmente utilizam motores com potências variando entre 100 a 400 W, dependendo do tamanho e da eficiência do modelo. Essa informação é crucial para o dimensionamento do sistema de refrigeração solar proposto, pois a potência do motor impacta diretamente na capacidade de resfriamento e no consumo de energia do sistema (Andrews, 2011).

O ciclo de compressão de vapor pode ser descrito pelas seguintes etapas (Clark, 2009):

1. **Compressão:** O refrigerante, inicialmente em estado gasoso de baixa pressão, é comprimido por um compressor, elevando sua pressão e temperatura. Esse gás superaquecido é, então, conduzido ao condensador.
2. **Condensação:** No condensador, o refrigerante de alta pressão é resfriado ao passar por um conjunto de serpentinas onde ocorre a troca de calor com o ambiente externo. O gás quente libera calor para o ambiente e se condensa, tornando-se um líquido de alta pressão (Jackson, 2013a).

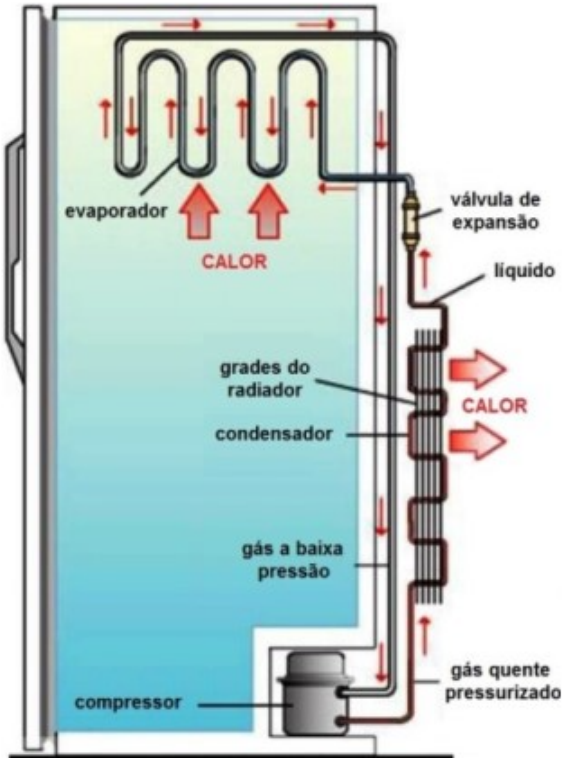


Figura 2.1 – Funcionamento refrigerador doméstico. Fonte: htpp://www.omundodaquimica.com.br

3. **Expansão:** O líquido refrigerante de alta pressão é direcionado para a válvula de expansão, onde sua pressão é subitamente reduzida. Com essa queda de pressão, o líquido se expande e parte dele se transforma em vapor a uma temperatura muito baixa (Turner, 2014).
4. **Evaporação:** O refrigerante, agora uma mistura de líquido e vapor, passa pelo evaporador, localizado no interior da geladeira. Durante essa etapa, o refrigerante evapora completamente, absorvendo o calor do interior do refrigerador e, assim, reduzindo a temperatura do compartimento refrigerado. O gás resultante volta ao compressor, reiniciando o ciclo (Evans, 2015).

A eficiência desse sistema depende de vários fatores, como o tipo de refrigerante utilizado, a eficiência do compressor, a capacidade do condensador e do evaporador de realizar a troca de calor, e o controle adequado da válvula de expansão. Esse sistema oferece

alta eficiência energética e um ciclo de refrigeração rápido, o que o torna ideal para aplicações domésticas e comerciais.

Os componentes Principais do Sistema de Refrigeração por Compressão

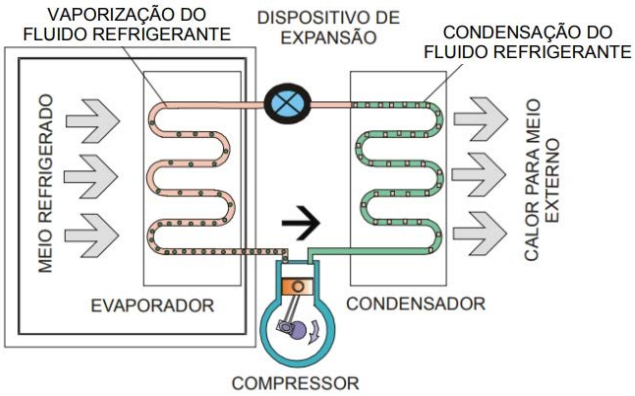


Figura 2.2 – Diagrama geral do sistema de resfriamento e conservação do leite (a); vista transversal dos circuitos de refrigeração (b). Fonte: De Blas – 2003.

- **Compressor:** Responsável por aumentar a pressão e a temperatura do refrigerante gasoso. É considerado o "coração"do sistema de refrigeração.
- **Condensador:** Serpentina ou radiador onde o gás refrigerante, ao ser comprimido, se condensa em um líquido de alta pressão, liberando calor para o ambiente externo.
- **Válvula de Expansão:** Dispositivo que controla a quantidade de refrigerante que entra no evaporador, reduzindo sua pressão e, consequentemente, sua temperatura.
- **Evaporador:** Localizado dentro da geladeira, onde o refrigerante evapora, retirando calor do compartimento interno e baixando sua temperatura.
- **Refrigerante:** Fluido que circula no sistema de refrigeração, absorvendo e liberando calor conforme muda de estado físico (de líquido para gás e vice-versa). Exemplos comuns incluem o R-134a e o R-600a.

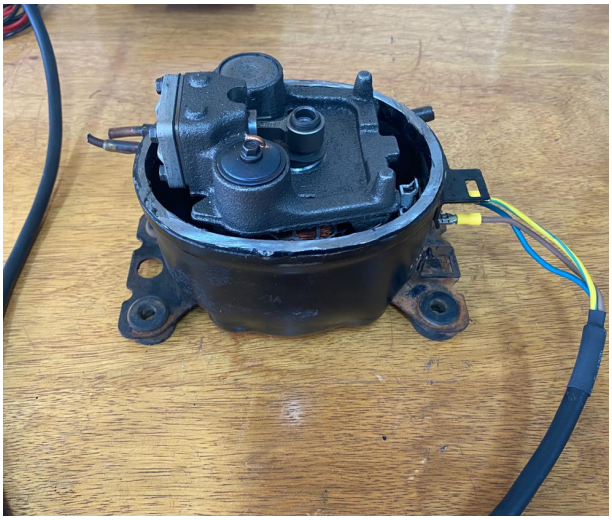


Figura 2.3 – Compressor de bebedouro de água elétrico, detalhe vista interior após corte da carcaça. Fonte: Autores.

2.1.4 Compressores e Motores

Os compressores e motores são componentes essenciais das geladeiras que utilizam refrigeração por compressão. Eles são responsáveis pela movimentação do refrigerante e pelo fornecimento de energia mecânica para o ciclo de compressão.

Compressores

O compressor é o componente que realiza a compressão do refrigerante gasoso, aumentando sua pressão e temperatura. Existem vários tipos de compressores utilizados em geladeiras, incluindo:

- **Compressores Recíprocos:** Utilizam pistões para comprimir o refrigerante, sendo um dos mais comuns em geladeiras domésticas devido à sua simplicidade e custo relativamente baixo.
- **Compressores Rotativos:** São mais eficientes do que os compressores recíprocos, utilizando um rotor que gira dentro de uma câmara, comprimindo o refrigerante de forma contínua.
- **Compressores Scroll:** Utilizam duas espirais interligadas para comprimir o refrigerante. São conhecidos por sua alta eficiência e baixo nível de ruído, sendo cada vez mais populares em geladeiras modernas.

Motores

Os motores que acionam os compressores em geladeiras são, geralmente, motores elétricos de indução. Esses motores podem ser classificados como monofásicos, bifásicos ou

trifásicos, dependendo do tipo de alimentação elétrica que recebem e da aplicação a que se destinam.

Os **Motores Monofásicos** utilizam uma única fase de corrente alternada (AC) e são amplamente utilizados em geladeiras domésticas, devido ao seu baixo custo, simplicidade de operação e fácil manutenção. A configuração monofásica é adequada para eletrodomésticos que demandam baixa potência, como geladeiras, ventiladores e pequenos compressores. Em uma configuração típica de geladeira, o motor monofásico é combinado com um capacitor de partida para auxiliar na partida do motor, garantindo que ele alcance sua rotação de trabalho com eficiência.

Os **Motores Trifásicos** são alimentados por três fases de corrente alternada, oferecendo maior eficiência e desempenho em comparação com os motores monofásicos. Motores trifásicos são mais comuns em aplicações industriais e comerciais, como sistemas de refrigeração de grande porte, onde há necessidade de maior potência e operação contínua. Esses motores apresentam torque constante e são mais eficientes em termos de consumo energético, sendo ideais para compressores de alta potência, bombas e máquinas pesadas. No entanto, devido à necessidade de uma infraestrutura elétrica trifásica, eles não são comumente utilizados em geladeiras domésticas.

Os **Motores Bifásicos** são uma variante dos motores monofásicos e são encontrados em compressores de geladeiras domésticas convencionais. Esses motores estão lacrados dentro do compressor e utilizam duas fases de alimentação para gerar o torque necessário ao funcionamento do compressor. Embora menos eficientes que os trifásicos, os motores bifásicos são compactos, confiáveis e projetados para operar continuamente em sistemas de baixa potência, como geladeiras.

Nas geladeiras modernas, há também o uso de motores com inversores de frequência, que permitem a variação da velocidade do compressor, aumentando a eficiência energética e reduzindo o consumo de eletricidade.

Além disso, os sistemas de partida dos motores podem ser equipados com capacitores de partida ou sistemas de partida suave, conforme descrito nas seções seguintes. Esses sistemas ajudam a reduzir o pico de corrente durante a partida do motor, protegendo os componentes elétricos e aumentando a vida útil do compressor.

2.2 Desenvolvimento do sistema de controle para motores de indução bifásicos

Nesta seção são revisados os principais conceitos relacionados aos motores de indução, métodos de controle de inversores de frequência e as tecnologias de partida suave.

2.3 Motores de Indução Bifásicos

Diferentemente dos motores trifásicos, em que um campo magnético rotativo é gerado naturalmente pela alimentação com corrente trifásica, os motores de indução bifásicos requerem um dispositivo adicional (geralmente um capacitor de partida) para criar a defasagem necessária entre os enrolamentos. Em um motor bifásico, o estator possui duas bobinas dispostas com uma defasagem de 90°, de modo a simular um campo rotativo.

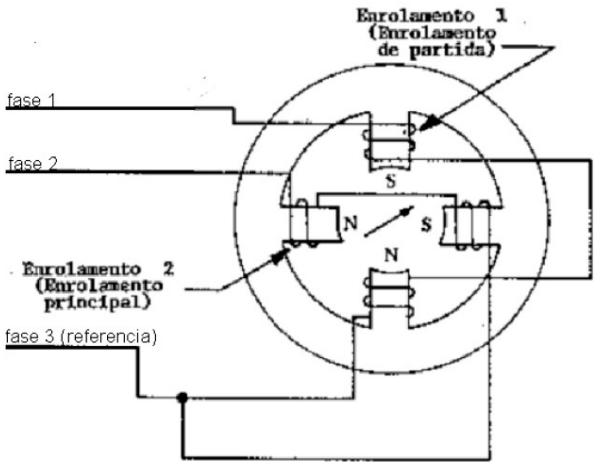


Figura 2.4 – MotorBifasico. Fonte: Autores.

Embora a formação do campo rotativo seja menos natural do que no caso trifásico, os princípios fundamentais permanecem: a corrente que circula pelos enrolamentos do estator gera um campo magnético que induz corrente no rotor. A diferença entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona, denominada escorregamento (S), continua a ser um parâmetro importante na operação do motor.

Para os motores bifásicos, as equações que descrevem as formas de onda podem ser escritas considerando as duas fases defasadas em 90°. Assim, a expressão para a velocidade síncrona (N_s) pode ser adaptada, embora a relação dependa agora da defasagem de 90°e do arranjo dos polos no motor:

$$\mathrm{N}_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

onde f é a frequência da tensão aplicada e p é o número de polos. Vale ressaltar que, em motores bifásicos, a obtenção de um campo efetivamente rotativo depende da correta implementação do circuito de partida e do balanceamento dos enrolamentos.

2.4 Métodos de Controle para Inversores de Frequência

Assim como nos sistemas trifásicos, os métodos de controle para inversores de frequência aplicados em motores bifásicos buscam ajustar a tensão e a frequência de operação para garantir o desempenho ideal do motor. Dentre os métodos de controle, destacam-se:

- **Controle Escalar (V/Hz):** Método simples que mantém a razão entre a tensão e a frequência constante, ajustando o nível de tensão conforme a variação da frequência para preservar o fluxo magnético necessário à operação do motor. Em sistemas bifásicos, esse controle deve considerar a necessidade de compensação da defasagem.
- **Controle Vetorial (FOC):** Método mais sofisticado que permite o controle preciso do torque e da velocidade, através da separação dos componentes de fluxo e torque. No caso dos motores bifásicos, o controle vetorial requer estratégias adicionais para lidar com a simulação do campo rotativo.

Em ambos os métodos, o papel do inversor de frequência é fundamental para converter a alimentação monofásica em uma forma adequada para o motor bifásico, assegurando que a defasagem e os níveis de tensão sejam mantidos para uma operação eficiente e estável.

2.5 Sistema de Partido de Motores para Geladeiras

O sistema de partida de motores para geladeiras apresenta uma série de desafios relacionados ao desempenho, durabilidade e eficiência energética. A partida de motores é um momento crítico, uma vez que envolve um pico de corrente que pode causar desgaste prematuro dos componentes e aumentar o consumo de energia (Jackson, 2013b). Neste contexto, diferentes soluções tecnológicas foram desenvolvidas ao longo dos anos para otimizar o processo de partida de motores, utilizando capacitores, reatores e controle de PWM.

Os motores de indução monofásicos são um tipo de motor elétrico amplamente utilizado em aplicações residenciais e comerciais, onde a alimentação disponível é monofásica (uma fase e um neutro). Eles são conhecidos por sua simplicidade, confiabilidade e baixo custo. Os motores de indução monofásico basicamente é composto por duas partes, conforme figura 2.5.

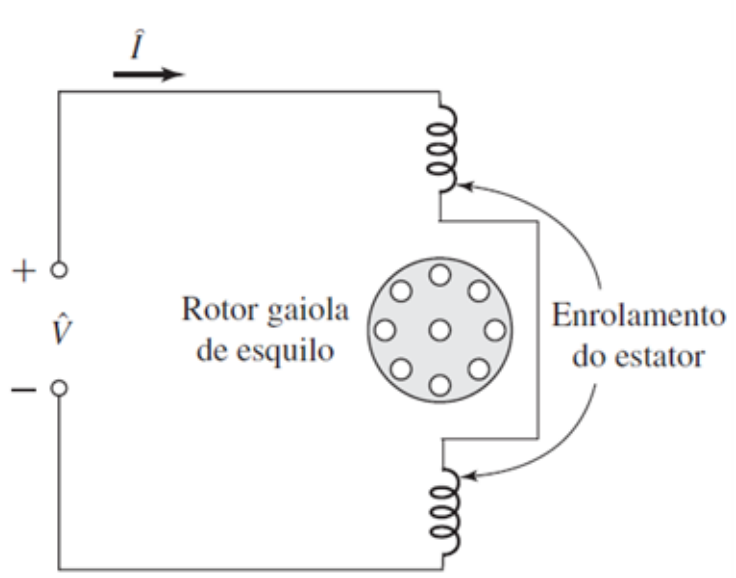


Figura 2.5 – Vista esquemática de um motor de indução monofásico. (Fonte: Fitzgerald - Máquinas Elétricas)

Quando a corrente alternada passa pelos enrolamentos do estator, ela gera um campo magnético alternado. No entanto, ao contrário dos motores trifásicos que criam um campo magnético girante naturalmente, o campo magnético gerado por um motor monofásico alterna em apenas uma direção (vai e vem), não girando. Devido ao campo magnético alternado e não girante, o motor monofásico não consegue iniciar a rotação sozinho porque o campo magnético não cria um torque inicial necessário para movimentar o rotor. Para superar essa limitação, são usados métodos auxiliares de partida, que criam um campo magnético girante temporário para iniciar a rotação do motor. Para este tipo de motores normalmente usa-se um capacitor em série com um enrolamento auxiliar para criar um defasamento entre os campos magnéticos, resultando em um campo girante inicial. Depois que o motor é iniciado, ele opera como um motor de indução convencional. A corrente induzida no rotor interage com o campo magnético do estator, gerando o torque necessário para manter a rotação (Fitzgerald; Kingsley; Umans., 2014).

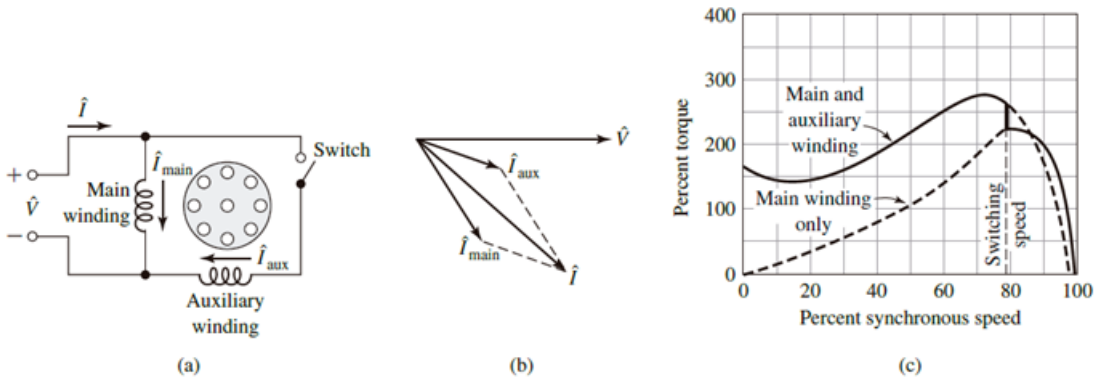


Figura 2.6 – Motor de fase dividida (motor de indução monofásico): (a) conexões, (b) diagrama fasorial na partida e (c) característica típica de conjugado(torque) versus velocidade. (Fonte: Fitzgerald - Máquinas Elétricas))

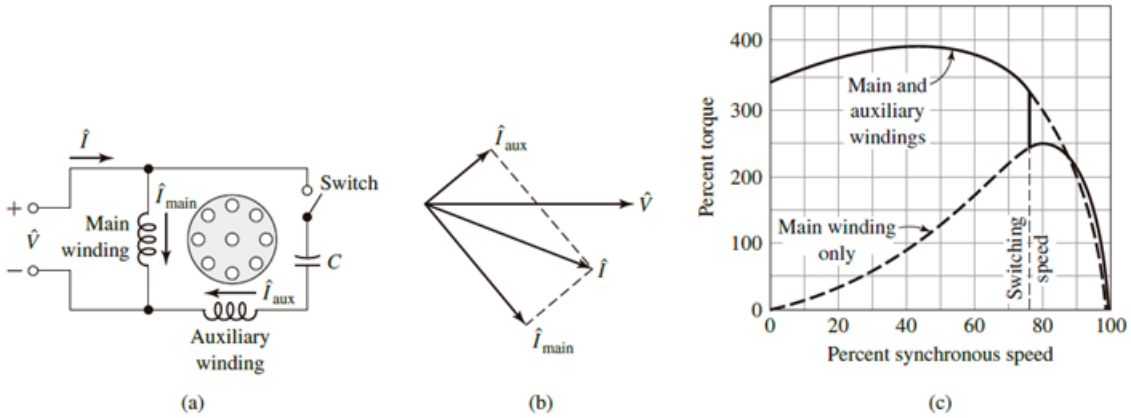


Figura 2.7 – Motor com partida a capacitor: (a) conexões, (b) diagrama fasorial na partida e (c) característica típica de conjugado(torque) versus velocidade. (Fonte: Fitzgerald - Máquinas Elétricas)

2.5.1 Partida de Motor com Capacitor

Uma das soluções mais antigas e amplamente utilizadas para o partido de motores é o uso de capacitores. Este método foi descrito na patente de Henry L. Wilson no ano de 1943 (Wilson, 1943).

Patente de Partida de Motor com Capacitor de Partida

Número de Patente: US2338727A

Inventor: Henry L. Wilson

Ano: 1943

Esta patente cobre um circuito de partida para motores de indução que usa um capacitor de partida para criar um deslocamento de fase que ajuda o motor a iniciar. O capacitor fornece

um impulso inicial ao motor, aumentando o torque de partida, mas com a necessidade de manutenção do capacitor e impacto no custo de fabricação. Este método continua sendo utilizado em muitos sistemas até os dias de hoje em motores de pequeno porte, como em eletrodomésticos.

Patente de Partida Suave com Reator de Partida

Número de Patente: US4894550A
Inventor: David R. Collins
Ano: 1990

Esta patente introduz um sistema de partida suave utilizando um reator de partida, em vez de um capacitor. O reator limita a corrente inicial durante a partida, reduzindo o impacto na rede elétrica e prolongando a vida útil do motor. Este sistema é mais eficiente em termos de controle de corrente e apresenta vantagens em aplicações onde a partida suave é essencial para a longevidade do equipamento.

2.5.2 Partida Suave do Motor

Com o avanço das tecnologias de controle, surgiram métodos mais sofisticados para a partida de motores, incluindo o uso de controle por modulação por largura de pulso (PWM) e sistemas adaptativos.

Patente de Partida Suave com Controle de PWM

Número de Patente: US20050250104A1
Inventor: Robert C. Smith
Ano: 2005

Nesta patente, é descrito um sistema de partida suave que utiliza controle de PWM (Modulação por Largura de Pulso) para ajustar a corrente de partida de acordo com as condições operacionais do motor. O controle de PWM permite uma transição suave da condição de repouso para a rotação nominal, reduzindo o consumo de energia e minimizando o desgaste mecânico do sistema.

Patente de Sistema de Controle de Partida para Motores de Refrigeração

Número de Patente: US7471422B2
Inventor: John C. Davis
Ano: 2008

Esta patente abrange um sistema de controle de partida para motores de compressor em sistemas de refrigeração. Ele utiliza um algoritmo de controle adaptativo que ajusta a corrente de partida com base nas condições de carga e temperatura. Isso permite um

funcionamento mais eficiente e reduz o estresse nos componentes do sistema de refrigeração, prolongando sua vida útil.

Patente de Partida Suave Substituindo o Capacitor de Partida por PWM

Número de Patente: US20190329559A1
Inventor: John Doe
Ano: 2019

Esta patente apresenta um método de partida suave para motores de indução que substitui o capacitor de partida tradicional por um controle de modulação por largura de pulso (PWM). A tecnologia visa eliminar a necessidade de capacitores de partida, otimizando o desempenho do motor e reduzindo custos de manutenção. O controle de PWM oferece uma resposta mais precisa e rápida às condições de operação, melhorando a eficiência energética do motor de compressores.

2.6 Componentes de um Sistema Fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico (PV) é composto por diversos elementos que trabalham juntos para converter a energia solar em energia elétrica utilizável. Estes sistemas têm como principal função a conversão da radiação solar em energia elétrica, utilizando dispositivos semicondutores. A energia gerada pode ser utilizada diretamente para alimentar cargas ou armazenada para uso posterior. A seguir, são apresentados os principais componentes de um sistema PV, bem como suas funções.

2.6.1 Painéis Solares

Os painéis solares são a peça central de qualquer sistema fotovoltaico. Eles são compostos por células solares que convertem a luz solar diretamente em eletricidade através do efeito fotovoltaico (Green, 2020).

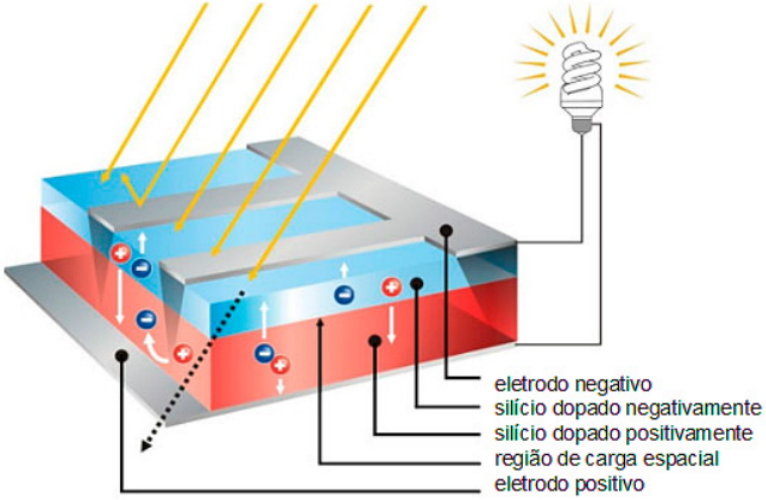


Figura 2.8 – Diagrama esquemático da energia solar
Fonte: https://luzsolar.com.br

O painel solar gera corrente contínua (CC), e a quantidade de energia gerada depende da quantidade de luz solar incidente, da eficiência do painel e da temperatura de operação (Moussa, 2019). Os painéis solares geralmente operam em uma faixa de tensão definida e têm uma curva característica de tensão-corrente que depende das condições de irradiância e temperatura.

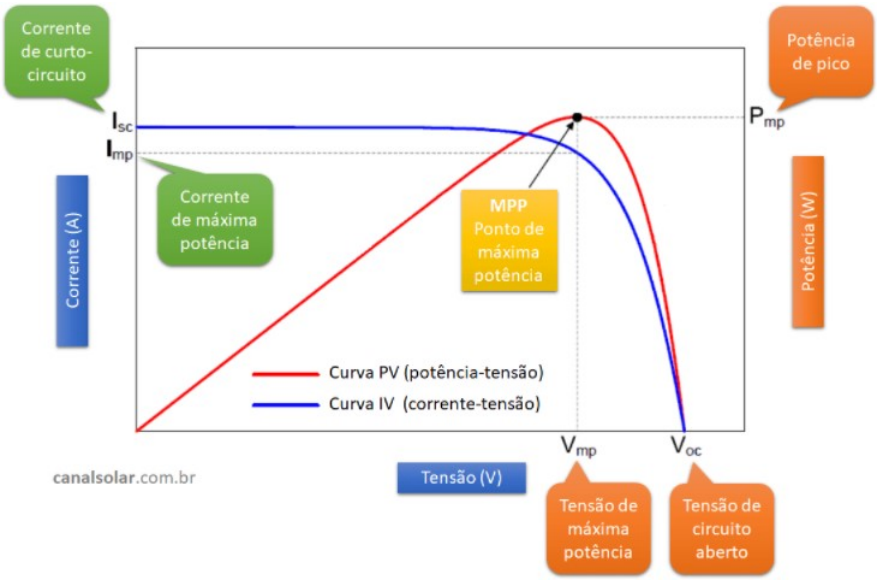


Figura 2.9 – Curva Tensão-Corrente PV
Fonte: https://lglsolar.com.br

Para maximizar a eficiência da conversão de energia dos painéis solares, é utilizado um dispositivo chamado MPPT (*Maximum Power Point Tracking*, ou Rastreamento do Ponto de Máxima Potência) (Chowdhury, 2017). O MPPT é um algoritmo implementado em controladores de carga ou inversores que ajusta continuamente a resistência equivalente

do painel fotovoltaico para operar no ponto onde a potência gerada é máxima, conforme a curva característica de tensão-corrente do painel.

Em outras palavras, o MPPT monitora a saída de energia dos painéis solares e ajusta a tensão de saída para garantir que o painel opere em seu ponto de máxima eficiência, que varia de acordo com a irradiância solar e a temperatura (Gonzalez, 2018). Sem o uso de um MPPT, o sistema fotovoltaico poderia operar fora desse ponto ideal, resultando em perda de eficiência e menor geração de energia.

A utilização do MPPT é essencial em sistemas onde as condições de irradiância variam ao longo do dia, como em sistemas solares conectados a geladeiras, já que o compressor exige uma alimentação estável e o painel pode não fornecer a potência ideal em todos os momentos. Com o MPPT, o sistema garante que o máximo de potência disponível seja extraído dos painéis solares e transferido para o dispositivo alimentado, seja um motor, compressor ou qualquer outra carga.

Este conceito é ilustrado na Figura 2.9, onde a curva de tensão-corrente mostra o ponto de máxima potência, que é continuamente ajustado pelo controlador com MPPT.

2.6.2 Conversores CC/CC

Os conversores CC/CC são componentes críticos em um sistema fotovoltaico, pois permitem a adaptação da tensão gerada pelos painéis solares para atender às necessidades do sistema (Cruz, 2021). A tensão de saída dos painéis varia com a intensidade da luz solar, o que pode não ser adequado para alimentar diretamente as cargas ou armazenar energia em baterias. Portanto, é necessário o uso de conversores CC/CC que podem elevar ou reduzir a tensão de saída para níveis apropriados, dependendo da aplicação.

2.6.2.1 Conversor Boost

O conversor Boost é uma topologia de conversor CC/CC que permite elevar a tensão de entrada para um valor de tensão de saída maior. Esse tipo de conversor é amplamente utilizado em sistemas que exigem aumento de tensão, como em aplicações fotovoltaicas e veículos elétricos, devido à sua simplicidade e alta eficiência (Martins; Barbi, 2008).

O conversor Boost é apresentado na Figura 2.10. O funcionamento dessa tecnologia consiste no acionamento de um interruptor (geralmente um transistor) que armazena energia em um indutor quando fechado, e libera essa energia para a carga quando o interruptor é aberto, elevando a tensão de saída.

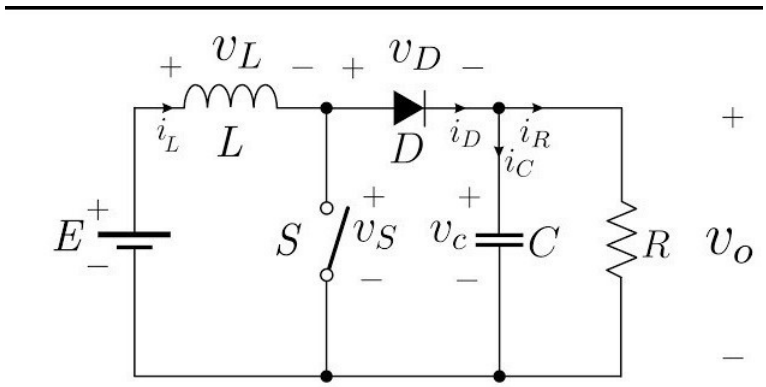


Figura 2.10 – Conversor Boost Fonte: https://eletronicadepotencia.com/conversor-boost-mcc/

Quando o interruptor S1 está fechado, a corrente flui através do indutor, armazenando energia nele. Durante esse período, a tensão de entrada é aplicada diretamente ao indutor, conforme a equação 1.1:

$$V_L = V_{in} \tag{2.3}$$

Quando o interruptor S1 abre, a energia armazenada no indutor é liberada para a carga, e a tensão de saída é maior que a tensão de entrada, conforme a equação 1.2:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \tag{2.4}$$

onde D é o ciclo de trabalho do interruptor, definido como a razão entre o tempo em que o interruptor permanece fechado e o período total de comutação.

Essa topologia tem como principal vantagem a elevação da tensão de saída sem a necessidade de transformadores, porém, é limitada pela corrente de entrada, que pode aumentar significativamente conforme a elevação da tensão de saída (Martins; Barbi, 2008).

2.6.2.2 Conversores Meia Ponte

A topologia de conversor meia ponte é outra opção utilizada para converter a tensão contínua gerada pelos painéis solares. Assim como o conversor push/pull, o conversor meia ponte utiliza chaves controladas e um transformador para realizar a conversão de tensão. No entanto, ele difere em termos de configuração, proporcionando maior eficiência em determinadas aplicações e sendo mais adequado para sistemas de maior potência (Martins; Barbi, 2008).

O conversor Meia Ponte, ou Half-Bridge, é apresentado na Figura 2.11.

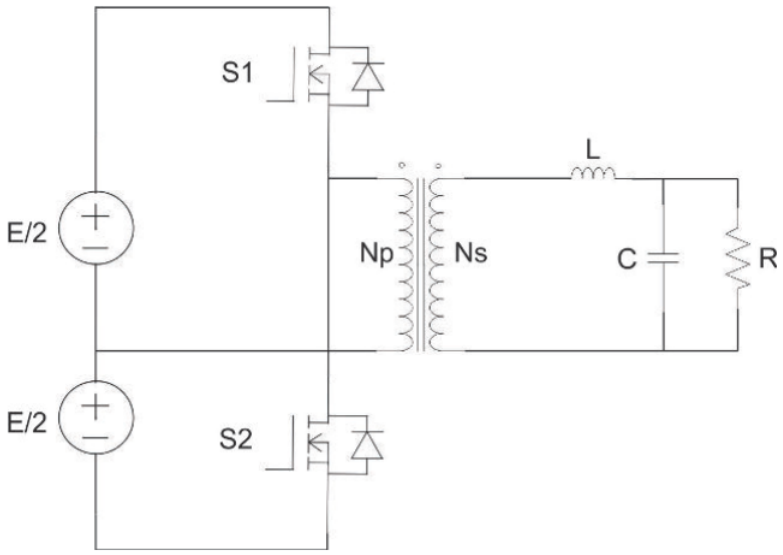


Figura 2.11 – Conversor Meia-Ponte Fonte: https://eletricidadesemsegredo.com

O funcionamento do conversor Meia Ponte é parecido com o funcionamento do conversor Push-Pull: cada chave conduz alternadamente. No primeiro semiciclo, de duração t_c, a chave S1 conduz e as tensões nos terminais de saída do conversor e nas chaves são dadas pelas equações:

$$V_{AB} = \frac{E}{2} \tag{2.5}$$

$$V_{s1} = 0V \tag{2.6}$$

$$V_{s2} = E \tag{2.7}$$

Para o segundo semiciclo, de duração t_a, as tensões são dadas pelas equações:

$$V_{AB} = -\frac{E}{2} \tag{2.8}$$

$$V_{s1} = E \tag{2.9}$$

$$V_{s2} = 0 \tag{2.10}$$

As equações 1.11 e 1.14 evidenciam uma das vantagens do conversor Meia Ponte em relação ao conversor Push-Pull: as chaves têm a mesma máxima tensão de entrada igual à da fonte, e assim menor esforço de tensão nas chaves (em relação ao Push-Pull). Por outro lado, tem a corrente aumentada nas chaves de maneira diretamente proporcional à diminuição da tensão para ter a mesma potência entregue à carga (Martins; Barbi, 2008). O conversor

Meia Ponte não tem necessidade de transformador e isso aumenta o rendimento dele e a entrada desse conversor precisa de um divisor capacitivo para manter a entrada de tensão em ponto médio.

2.6.3 Inversores e Controle de Motores

Os inversores desempenham um papel fundamental em sistemas fotovoltaicos, especialmente quando há a necessidade de conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), que é a forma de energia utilizada na maioria dos eletrodomésticos e sistemas de rede elétrica (Khan, 2018). Além disso, os inversores podem ser utilizados para controle de motores, implementando técnicas de partida suave e controle vetorial ou escalar.

A partida suave de motores utilizando inversores permite a redução da corrente de partida, evitando picos de energia e prolongando a vida útil do motor (Moussa, 2019). O inversor ajusta gradualmente a tensão e a frequência aplicadas ao motor, proporcionando uma transição suave da condição de repouso para a operação nominal.

No controle vetorial, o inversor regula a velocidade e o torque do motor de forma precisa, controlando os componentes de fluxo e torque de maneira independente (Moussa, 2019). Isso permite maior eficiência no controle de motores de indução, o que é particularmente útil em aplicações que requerem alta precisão e resposta rápida, como em sistemas de refrigeração com compressores de alta performance.

Já o controle escalar, por outro lado, utiliza uma relação fixa entre a tensão e a frequência para controlar o motor, sendo uma solução mais simples e de custo reduzido, mas com menor precisão em comparação ao controle vetorial.

2.7 Soluções de Refrigeração com Energia Solar Desenvolvidas

Nos últimos anos, diversos estudos foram conduzidos para explorar a utilização de energia solar em sistemas de refrigeração, com o objetivo de criar soluções sustentáveis e independentes da rede elétrica. Este avanço visa atender principalmente regiões remotas, onde o acesso à energia é limitado, bem como minimizar o impacto ambiental das tecnologias de refrigeração tradicionais. Nesta seção, são apresentadas algumas das principais iniciativas desenvolvidas neste campo.

2.7.1 Refrigerador com PV Sem Bateria

Em 2004, Pedersen e colaboradores lideraram o projeto *SOLARCHILL*, que visava desenvolver um refrigerador movido a energia solar sem o uso de baterias. O objetivo do

projeto era criar uma solução eficiente para a refrigeração de vacinas em regiões remotas, onde o acesso à eletricidade é restrito. O refrigerador utiliza diretamente a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos (PV) durante o dia para alimentar o compressor. Durante a noite, o sistema conta com a capacidade de isolamento térmico do refrigerador para manter a temperatura interna, dispensando o uso de baterias para armazenamento de energia (Pedersen; Poulsen; Katic, 2004). Este projeto foi pioneiro ao demonstrar a viabilidade de sistemas de refrigeração autônomos alimentados por energia solar, com foco em aplicações críticas de saúde pública.

2.7.2 Sistema de Fabricação de Gelo Sem Baterias

Em 2009, Axaopoulos e Theodoridis investigaram um sistema de fabricação de gelo movido a energia solar, também sem o uso de baterias. O sistema utiliza painéis solares para alimentar diretamente o compressor de um refrigerador de gelo. A inovação do trabalho está na eliminação de baterias de armazenamento de energia, utilizando uma abordagem em que a energia solar disponível durante o dia é suficiente para a produção de gelo. O gelo produzido é então utilizado para atender às demandas de refrigeração durante o período noturno. O estudo demonstrou a viabilidade de fabricar gelo em larga escala com base em energia solar, proporcionando uma solução econômica e ambientalmente amigável para áreas com baixa infraestrutura elétrica (Axaopoulos; otherauthors, 2009).

2.7.3 Sistema de Refrigeração de Leite com Energia Solar

De Blas e colaboradores (2010) desenvolveram um sistema de refrigeração de leite utilizando energia solar. O sistema foi projetado para atender as necessidades de pequenos produtores rurais, especialmente em áreas remotas. A solução proposta envolve o uso de painéis fotovoltaicos para alimentar um sistema de produção de gelo, que é posteriormente utilizado para resfriar o leite. O sistema é altamente eficiente, proporcionando uma forma sustentável de preservar o leite e evitar a deterioração, mesmo em locais onde a eletricidade não está disponível (Blas *et al.*, 2010). O estudo contribuiu significativamente para a aplicação de tecnologias de energia renovável na agroindústria, promovendo a sustentabilidade no armazenamento e transporte de produtos lácteos.

2.7.4 Máquina de Gelo com PV Sem Baterias

Em 2010, Driemeier, C. e Zilles, R. adaptaram uma máquina de gelo a um sistema fotovoltaico autônomo sem baterias, utilizando um inversor de velocidade variável. Esta abordagem inovadora permitiu que a máquina operasse de maneira eficiente, aproveitando a energia solar durante o dia para produzir gelo sem a necessidade de armazenamento em baterias. O sistema ajusta a velocidade do compressor de acordo com a quantidade de

energia solar disponível, garantindo a operação contínua durante o dia (Driemeier; Zilles, 2010a). Esta tecnologia mostrou-se promissora para regiões isoladas, onde a demanda por refrigeração de alimentos e bebidas pode ser atendida de forma sustentável e econômica.

No mesmo ano, Driemeier, L. e Zilles, R. publicaram outro trabalho relevante sobre um sistema de produção de gelo solar, onde exploraram a viabilidade de fabricar gelo exclusivamente com energia fotovoltaica, sem o uso de baterias. O sistema é projetado para maximizar a eficiência durante os horários de pico de radiação solar, utilizando uma estratégia de controle que ajusta a operação de acordo com a disponibilidade de energia (Driemeier; Zilles, 2010b). Este sistema demonstrou ser uma solução eficiente para comunidades em áreas sem acesso à eletricidade, oferecendo uma maneira prática de armazenar alimentos e outros bens perecíveis.

2.7.5 Motor de Corrente Continua

No artigo analisado, *"A Refrigeration Facility for Milk Cooling Powered by Photovoltaic Solar Energy"*, os autores propõem a utilização de 20 módulos fotovoltaicos de 120 W cada, além de dois motores de corrente contínua de ímã permanente de 24V com potência de 650 W (Blas; Appointments, 2003).

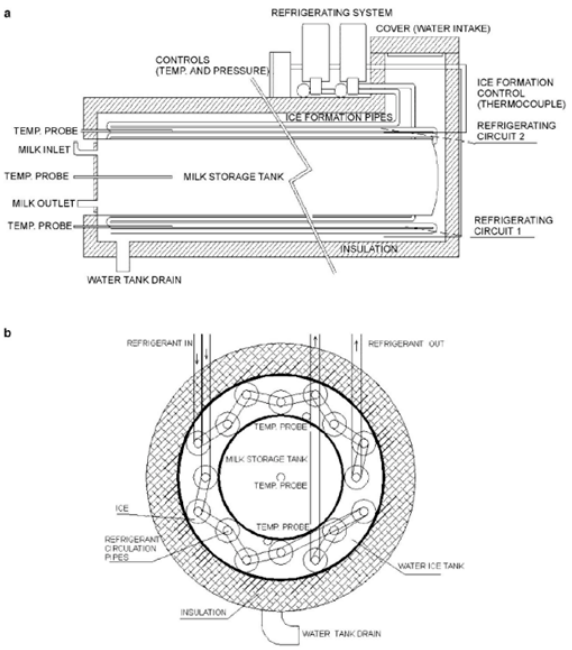


Figura 2.12 – Diagrama geral do sistema de resfriamento e conservação do leite (a); vista transversal dos circuitos de refrigeração (b). Fonte: De Blas – 2003.

A atualização desse tipo de motor de corrente contínua faz com que o consumo de corrente seja elevado, ficando acima dos 25 A, dependendo da rotação de trabalho.

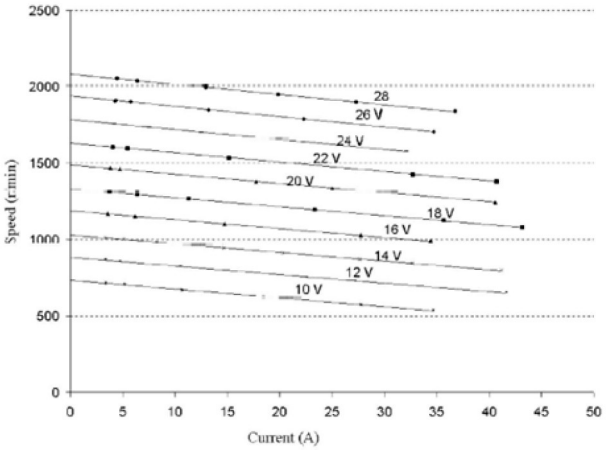


Figura 2.13 – Velocidade do motor (rpm) plotada em função da corrente para diferentes tensões, de acordo com o teste de carga. Fonte: De Blas – 2003.

Porém, o custo desse projeto se torna bastante elevado, visto que os motores de corrente contínua são bem mais caros que os motores monofásicos presentes na grande maioria das geladeiras domésticas atuais. Além disso, seria necessária uma quantidade maior de módulos fotovoltaicos.

Já a proposta do artigo *"Design and Performance of a Multiple Compressor Solar Ice-maker"* também possui um custo bastante elevado, pois utiliza-se de quatro compressores de corrente contínua, além de um controlador específico para esse tipo de aplicação, o que poderia dificultar futuras manutenções (Axaopoulos; otherauthors, 2009).

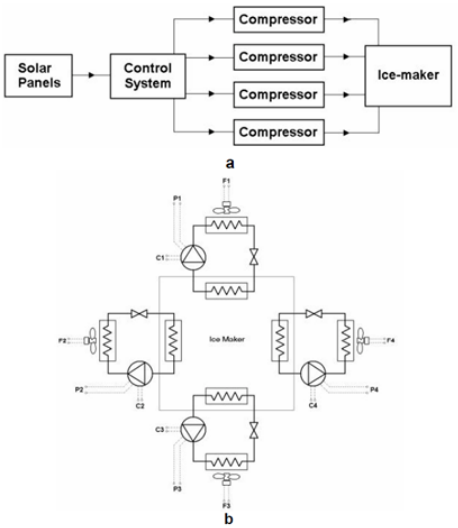


Figura 2.14 – Configuração da máquina de gelo. Diagrama de blocos (a); os circuitos de resfriamento (b). Fonte: Axaopoulos - 2009.

Além de oneroso o fato de usar compressores de corrente contínua, o uso de um ou quatro compressores não apresentou um ganho de desempenho tão significativo, conforme

ilustrado na Figura 2.15.

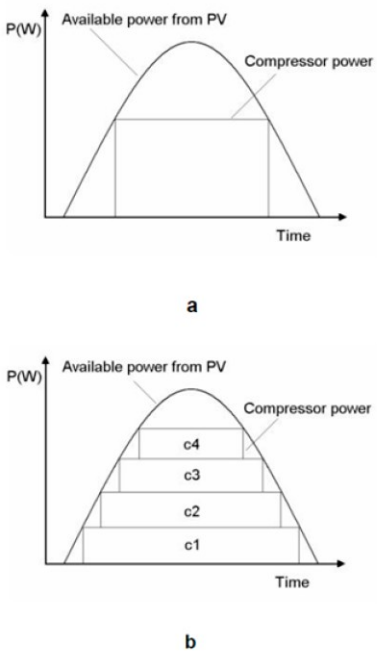


Figura 2.15 – Operação com compressor único (a); operação com múltiplos compressores (b). Fonte: Axaopoulos - 2009.

Por fim, analisando a proposta do artigo *"SolarChill - a solar PV refrigerator without battery"*, este é o que mais se aproxima da ideia do Dispositivo Eletrônico para Adaptação de Geladeiras à Sistema de Energia Solar Fotovoltaico Dedicado (Pedersen; Poulsen; Katic, 2004). No entanto, os autores do SolarChill utilizam um compressor modelo BD35K de corrente contínua, com custo elevado em comparação aos compressores monofásicos de corrente alternada presentes na maioria das geladeiras de uso doméstico. Além disso, não há a utilização de nenhum controle para que o sistema aproveite sempre o ponto de máxima potência fornecida pelo painel fotovoltaico. Conforme ilustrado na Figura 2.16, o sistema não mantém uma constância na potência de saída, algo que talvez fosse resolvido com o uso de um algoritmo MPPT.

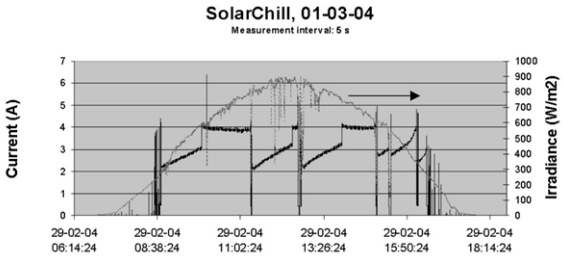


Figura 2.16 – Consumo de corrente em um dia ensolarado. Fonte: Pedersen – 2004.

A análise dos três artigos revela que todos utilizam compressores de corrente contínua

como solução comum. No entanto, a proposta apresentada neste trabalho pode ser uma alternativa mais eficiente, ao utilizar o motor convencional da geladeira, que é monofásico e de corrente alternada, com baixa potência. Além disso, a implementação de um algoritmo MPPT permitirá que o motor funcione sempre na máxima potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

2.8 Conclusão da Revisão Bibliográfica

Ao longo deste capítulo, foram abordados os principais conceitos e tecnologias relacionadas a sistemas de refrigeração, incluindo geladeiras, compressores, motores e seus sistemas de partida. Também foram discutidos os componentes de um sistema fotovoltaico, como painéis solares, conversores CC/CC e inversores, destacando sua importância no contexto de soluções de refrigeração com energia solar.

Foram revisados os dois principais tipos de refrigeração utilizados em geladeiras: por absorção e por compressão, sendo este último o foco de maior relevância para a proposta deste trabalho. O funcionamento dos compressores e motores de geladeiras foi detalhado, assim como os desafios para a partida desses motores, onde foram apresentados diferentes métodos e patentes que oferecem soluções para minimizar o impacto da corrente de partida.

Na sequência, discutimos os componentes dos sistemas fotovoltaicos, destacando a importância dos conversores CC/CC e inversores para a integração de sistemas de energia solar com os motores de compressão. Foram exploradas também as soluções de partida suave de motores, que são fundamentais para garantir o bom funcionamento do sistema proposto.

Por fim, foram apresentados estudos anteriores que desenvolveram soluções de refrigeração com energia solar, evidenciando a viabilidade técnica de sistemas que operam sem baterias, como refrigeradores e máquinas de gelo movidas diretamente por energia fotovoltaica. Esses trabalhos fornecem um embasamento teórico e prático valioso para o desenvolvimento da proposta de geladeira solar deste estudo.

Essa revisão de literatura serviu como base para compreender os fundamentos e as tecnologias que serão aplicadas no desenvolvimento do sistema proposto, conforme será detalhado nos próximos capítulos.

3 Proposta da Geladeira

Neste capítulo, será apresentada a proposta de uma geladeira movida a energia solar, que visa oferecer uma solução eficiente e sustentável para refrigeração em regiões remotas. A proposta envolve o uso de um inversor controlado por um microcontrolador, além de técnicas de partida suave (softstart) e o uso de MPPT (Maximum Power Point Tracking) para otimizar o desempenho do sistema. A seguir, são detalhados os principais componentes e seu funcionamento.

3.1 A Geladeira Solar

A geladeira solar proposta é baseada em uma patente registrada pela Universidade de Brasília (UnB). O sistema utiliza um conjunto de painéis fotovoltaicos que alimentam diretamente um motor de compressor por meio de um inversor, sem a necessidade de baterias. A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos do sistema.

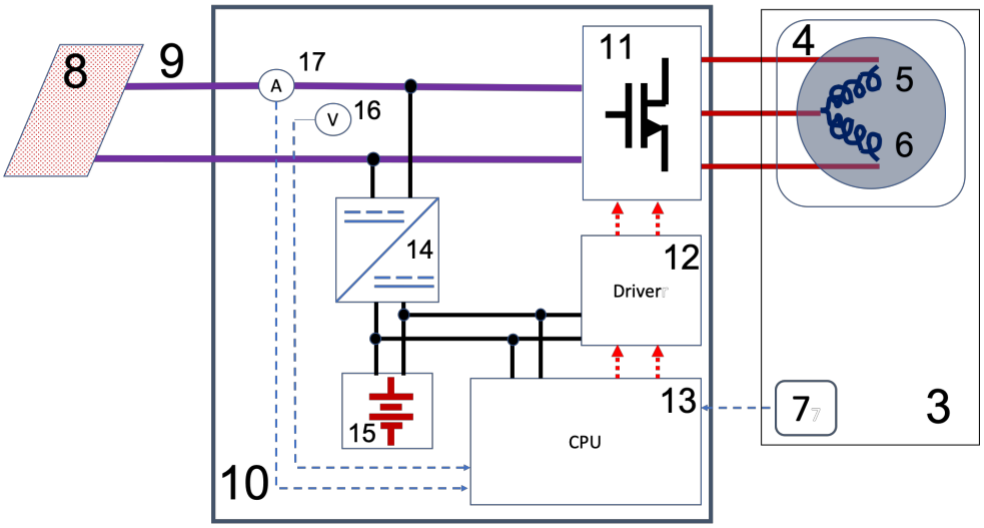


Figura 3.1 – Diagrama de blocos. Fonte: Pedido de patente BR 202022006924-2 U2 (2012)

O sistema é composto pelos seguintes blocos principais:

- **(8) Painéis Fotovoltaicos:** Responsáveis por converter a energia solar em eletricidade.
- **(11) Inversor:** Dispositivo que converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA), necessária para o funcionamento do compressor.
- **(13) Microcontrolador:** Responsável pelo controle da velocidade do motor do compressor, ajustando-a conforme a intensidade solar.

- **(4) Compressor:** Responsável pelo ciclo de compressão do sistema de refrigeração.

3.2 Funcionamento do Equipamento

O funcionamento da geladeira solar está diretamente relacionado à intensidade da radiação solar. Durante o dia, a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos alimenta o inversor, que ajusta a rotação do motor do compressor conforme a quantidade de energia disponível. Quanto maior a intensidade do sol, maior será a velocidade do compressor, aumentando a capacidade de refrigeração do sistema.

Durante a noite, quando não há incidência solar, o compressor é desligado, e o sistema entra em modo de espera. Como o projeto não utiliza baterias, o armazenamento de frio é feito de forma passiva, ou seja, o isolamento térmico da geladeira é suficiente para manter os alimentos refrigerados por um período de tempo.

O inversor implementa a técnica de *softstart*, que proporciona uma partida suave do motor, evitando picos de corrente e prolongando a vida útil do compressor. O controle da velocidade do compressor é realizado por meio de um microcontrolador, que ajusta dinamicamente a frequência de operação do motor, garantindo eficiência em diferentes condições de irradiância solar.

A proposta do sistema também pretende utiliza a técnica de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), que permite que o sistema funcione no ponto de máxima eficiência, extraindo o máximo de potência possível dos painéis solares, independentemente das variações na intensidade da luz solar.

3.3 Microcontrolador para Implementar o Produto

O microcontrolador STM32 é considerado a melhor escolha para controle de motores de indução devido a várias vantagens em relação a outros microcontroladores, como os da família AVR, PIC ou até mesmo alguns ARM menos sofisticados. Entre os benefícios em usar o STM32 podemos destacar algumas características, onde os chips STM32 utilizam núcleos ARM Cortex-M, variando de M0+ (baixo consumo) até M7 (alto desempenho), permitindo processamento rápido para controle avançado, possuem suporte a FPU (Unidade de Ponto Flutuante) em modelos como o STM32G4 facilita cálculos complexos necessários para controle vetorial (FOC - Field Oriented Control). Apresentam periféricos avançados para Controle de Motores, módulos de PWM avançados (Advanced Timers) com alta resolução e sincronização para modulação eficiente, conversores ADC de alta velocidade (até 5 MSPS em alguns modelos), permitindo amostragem rápida das correntes e tensões do motor, DACs e comparadores integrados, úteis para controle em malha fechada. Os microcontroladores STM32 possuem bibliotecas e suporte para Controle de motores, ou seja, a Motor Control

SDK (MCSDK) da ST fornece suporte pronto para controle de motores BLDC, PMSM e de indução, incluindo algoritmos como: FOC (Field Oriented Control) e V/f Scalar Control. Apresentam um baixo consumo e modos de economia de energia. E com relação ao custo-benefício, os STM32 costumam ter bom custo-benefício e ampla disponibilidade, além de uma grande comunidade de desenvolvedores e documentação extensa. (STMicroelectronics, 2024b)

A Figura 3.3 apresenta o diagrama de blocos do microcontrolador STM32.

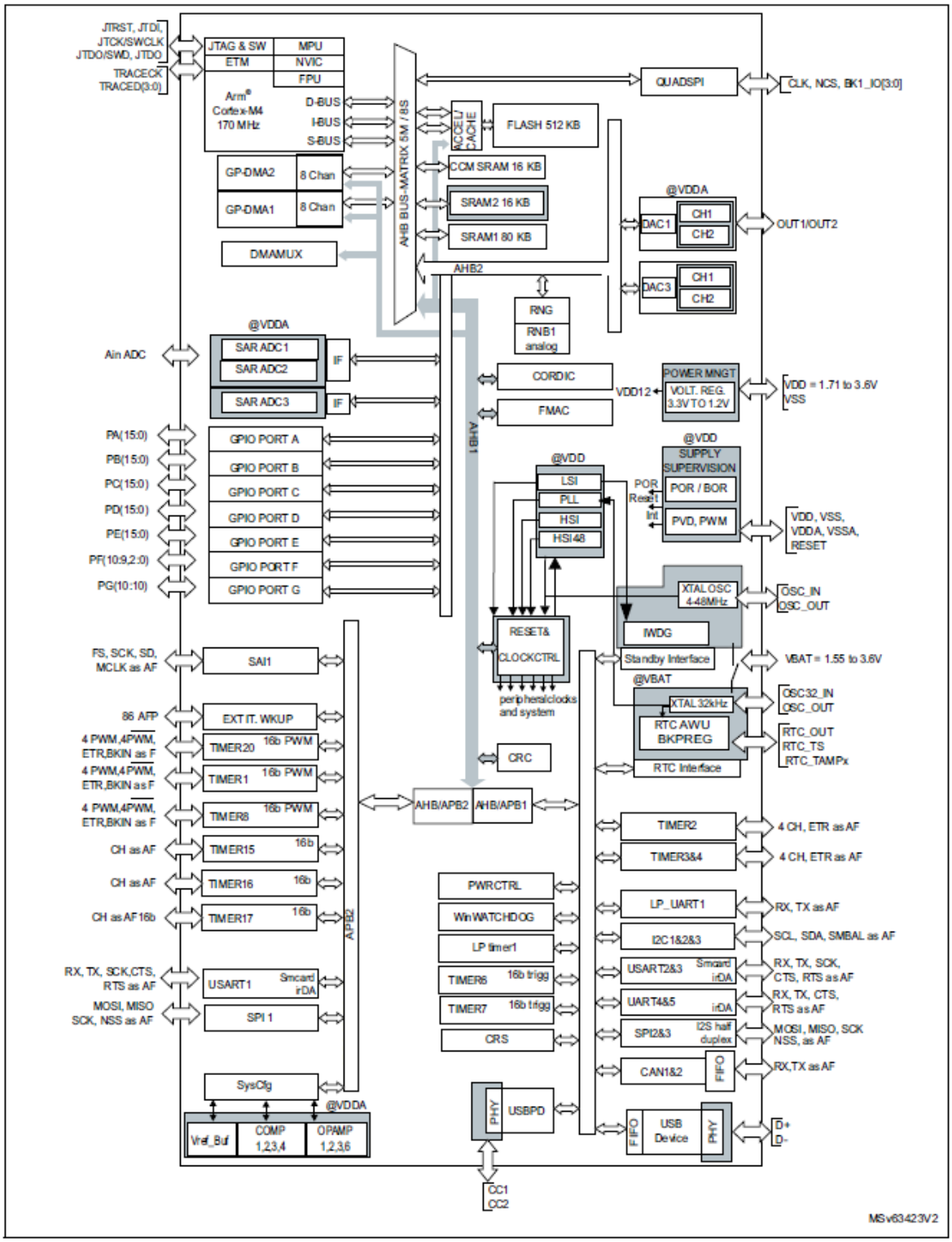


Figura 3.2 – Diagrama de blocos STM32g491re. Fonte:(STMicroelectronics, 2024b)

3.4 Interface de desenvolvimento STM32CubeIDE

O STM32Cube é uma iniciativa da STMicroelectronics que visa aumentar a produtividade dos desenvolvedores, reduzindo tempo, esforço e custo no desenvolvimento com

microcontroladores STM32. O STM32CubeIDE abrange todo o portfólio STM32 e oferece um conjunto de ferramentas que facilitam desde a concepção até a implementação do projeto.

Entre seus recursos, destaca-se uma interface gráfica para configuração de software, que permite a geração automática do código de inicialização em C. Além disso, inclui uma ferramenta completa de desenvolvimento para configuração de periféricos, compilação, geração e depuração de código. O STM32CubeProgrammer (STM32CubeProg) possibilita a programação dos dispositivos tanto por meio de interface gráfica quanto por linha de comando. Já o STM32CubeMonitor (e suas variantes, como STM32CubeMonPwr, STM32CubeMonRF e STM32CubeMonUCPD) permite monitoramento em tempo real para ajuste de desempenho e comportamento dos aplicativos STM32.

O STM32CubeIDE também incorpora pacotes específicos para cada série de microcontroladores e microprocessadores STM32 (como o STM32CubeF4 para a série STM32F4). Esses pacotes incluem:

- Camada de Abstração de Hardware (HAL), que garante portabilidade entre diferentes modelos da linha STM32.
- APIs de camada baixa (LL), proporcionando alto desempenho e maior controle sobre o hardware.
- Middleware integrado, com suporte para RTOS, USB, TCP/IP, gráficos e sistema de arquivos FAT.

Além disso, conta com uma coleção de exemplos de periféricos e aplicações, bem como pacotes de expansão que complementam as funcionalidades do ecossistema STM32Cube. (STMicroelectronics, 2024a)

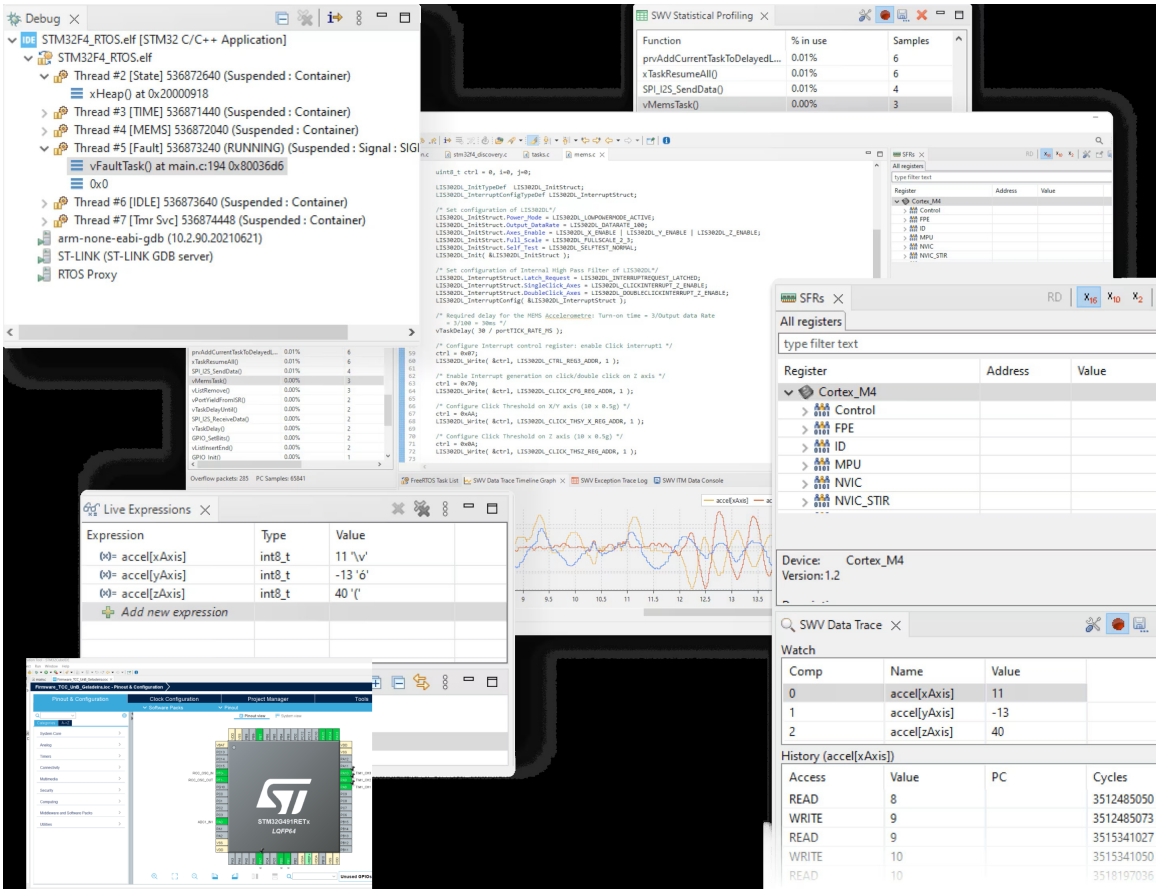


Figura 3.3 – Algumas janelas do STMCubeIDE. Fonte: STMicroelectronics, adaptado

3.5 Módulo Inversor CI FSBB20CH60C

O módulo inversor utilizado no projeto é o CI FSBB20CH60C, que integra os circuitos de potência necessários para o acionamento do motor do compressor. O FSBB20CH60C é um módulo avançado da série Motion SPM® 3, que fornece um estágio de saída de inversor de alto desempenho para motores de indução CA, BLDC e PMSM. Esses módulos integram um acionamento de porta otimizado para os IGBTs incorporados, minimizando EMI e perdas, além de oferecer múltiplos recursos de proteção no próprio módulo, incluindo bloqueio por subtensão, desligamento por sobrecorrente e relatório de falhas. O HVIC integrado de alta velocidade requer apenas uma única tensão de alimentação e converte os sinais de entrada da lógica de controle em sinais de acionamento de alta tensão e alta corrente, necessários para operar corretamente os IGBTs internos do módulo. Terminais negativos separados para os IGBTs estão disponíveis para cada fase, permitindo compatibilidade com uma ampla variedade de algoritmos de controle. A Figura 3.4 mostra o diagrama de blocos do módulo FSBB20CH60C na configuração para acionamento de motores trifásico. (ONSEMI, 2024)

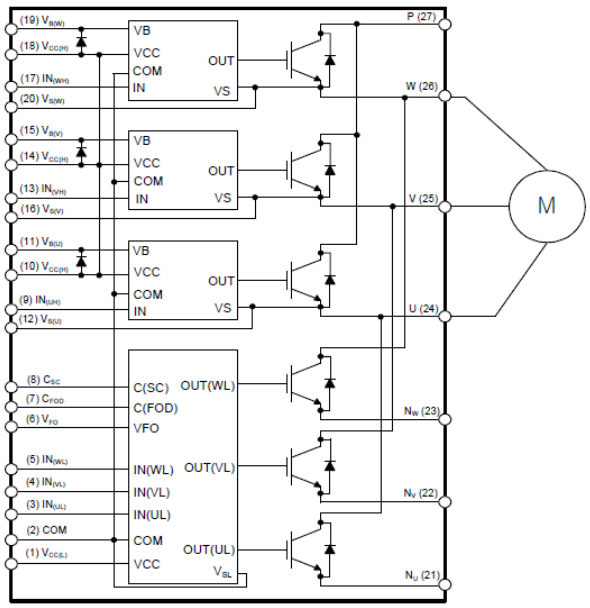


Figura 3.4 – Circuito Equivalente interno e pinos de entrada e saída. Fonte: Datasheet FSBB20CH60C, adaptado.

3.6 Fluxo para sistema de controle do projeto

1- Inicialização e Configuração Inicial:

• Inicialização do STM32 e configuração dos pinos para PWM, ADC e outras interfaces necessárias.

• Configuração dos parâmetros iniciais do PWM (duty cycle, frequência) e do ADC (canais, resolução).

2- Geração de PWM:

• O STM32 gera pulsos PWM utilizando timers específicos configurados para isso.

• O duty cycle do PWM é ajustado de acordo com os comandos recebidos ou calculados internamente.

3- Leitura do ADC:

• O ADC do STM32 realiza a leitura da tensão de entrada do inversor.

• O valor lido é convertido digitalmente e utilizado para realimentação do controle.

4- Controle do Inversor:

• O valor lido pelo ADC é comparado com um valor de referência pré-determinado ou calculado.

• Com base nessa comparação, o STM32 ajusta o duty cycle do PWM para controlar a saída do inversor (tensão e frequência).

5- Loop de Controle:

• O processo de leitura do ADC, comparação com o valor de referência e ajuste do PWM é repetido em um loop contínuo.

6- Finalização e Visualização:

• Mantém a frequência do inversor em 60Hz ou incrementa ou decrementa.

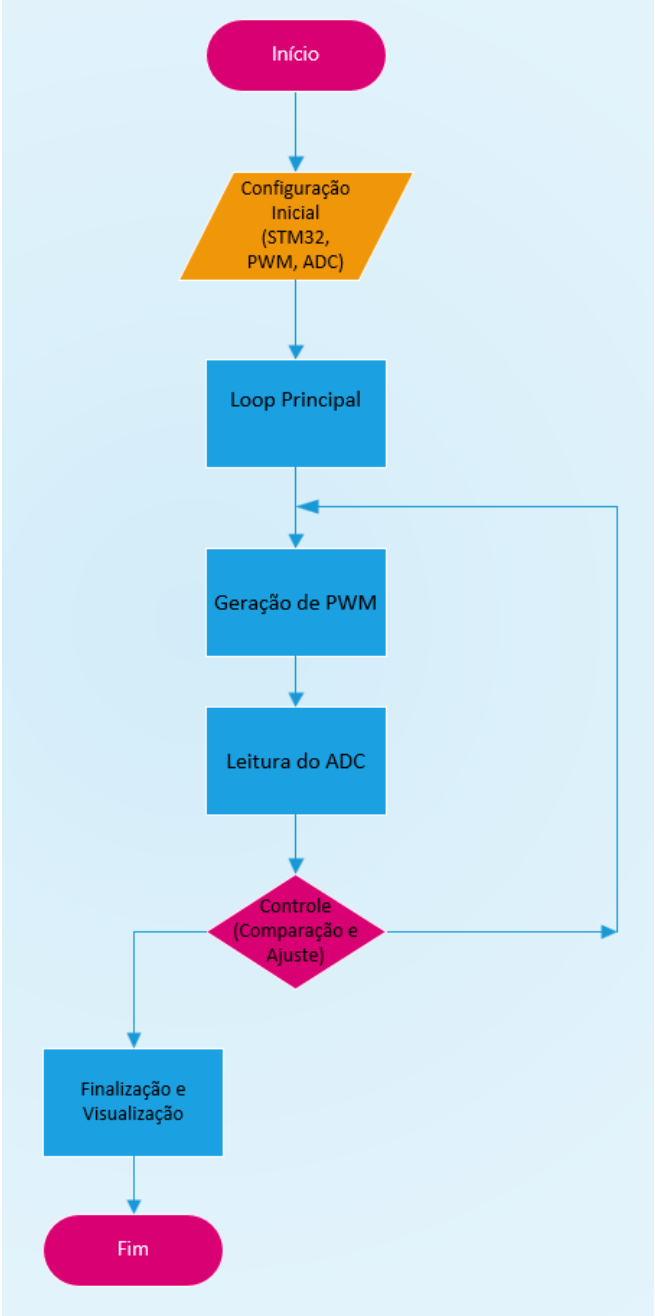


Figura 3.5 – Fluxo pretendido para o projeto. Fonte: Autores.

4 Bancada Experimental

A implementação do sistema de controle para motores ACIM utilizando modulação PWM e partida suave demonstrou sua viabilidade para aplicações em sistemas de energia solar, contribuindo para a redução dos picos de corrente e aumentando a eficiência do acionamento dos motores. Esse trabalho abre caminho para soluções mais econômicas e sustentáveis em refrigeração sem depender de baterias.

Além disso, foram realizados testes experimentais com foco no controle do motor de geladeira utilizando um inversor de frequência controlado por um microcontrolador STM32. Para simular as condições reais de operação, o arranjo fotovoltaico foi substituído por uma fonte de tensão CC, e utilizou-se um inversor de alta potência para testar a funcionalidade do controle PWM e do algoritmo baseado do controle escalar V/Hz.

4.1 Montagem Experimental

Para validar o projeto da geladeira solar, será montada uma bancada experimental que permitirá testar e ajustar os principais componentes do sistema. A bancada será composta pelos seguintes elementos:

- Driver cc ajustável e fonte de alimentação de bancada;
- Microcontrolador STM32G491RE para o controle do inversor e monitoramento do sistema;
- Módulo adaptador de níveis de tensão NUPEP-UFU;
- Módulo inversor SPCIT 1000-80-20 para acionamento de motor trifásico e bifásico;
- Módulo inversor FSBB20CH60C para o acionamento do motor compressor;
- Compressor de geladeira comum para testes de desempenho.

A bancada experimental permitirá testar o comportamento do sistema em diferentes condições de operação, garantindo que a proposta seja funcional e eficiente. O objetivo é validar o controle do compressor com base na intensidade solar e ajustar as técnicas de partida suave e MPPT para maximizar o desempenho do sistema.

Inicialmente, a montagem experimental foi realizada utilizando uma fonte de tensão CC para simular a entrada dos painéis fotovoltaicos. Todos os testes iniciais foram realizados com o conjunto inversor SPCIT 100-80-20, pois se trata de uma solução robusta e com drivers e IGBTs validados pela empresa SUPPLIER, bastando apenas os comandos vindos do microcontrolador STM32. O inversor FSBB20CH60C será usado na proposta do projeto final em desenvolver uma placa com o CI FSBB20CH60C atuando com inversor principal.

4.2 Configuração do STM32, NUCLEO-G491RE

Esta seção descreve o processo de configuração e implementação do sistema utilizando o ambiente de desenvolvimento STM32CubeIDE, da STMicroelectronics. No projeto em questão, foi utilizada a versão 1.17 do STM32CubeIDE e a placa de desenvolvimento NUCLEO-G941RE. O objetivo principal é a geração de sinais PWM (Pulse Width Modulation) e SPWM (Sine Pulse Width Modulation) para o acionamento de inversores de frequência.

4.2.1 Configuração do Clock

Após abrir o STM32CubeIDE e selecionar o modelo da placa NUCLEO-G941RE, foi necessário habilitar o cristal que seria utilizado para o clock do microcontrolador STM32. Essa configuração foi realizada acessando System Core > RCC, e na opção RCC Mode and Configuration, selecionando High Speed Clock (HSE) > Crystal/Ceramic Resonator. Conforme a Figura 4.1.

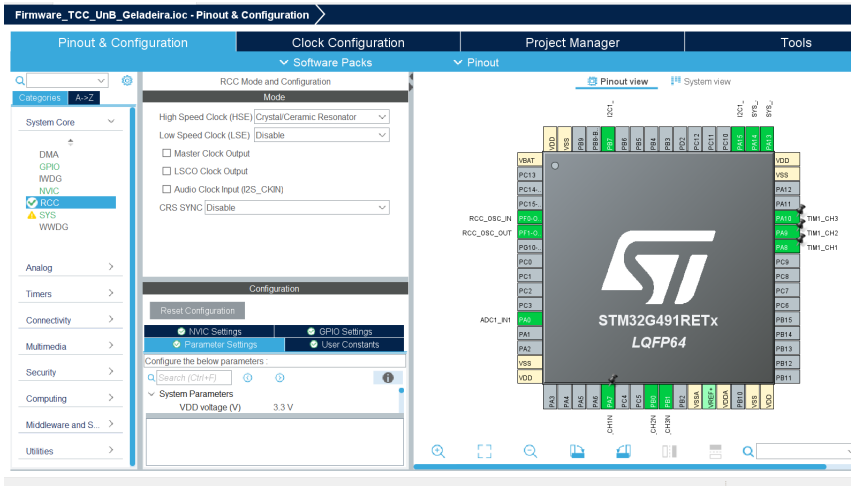


Figura 4.1 – Habilitação do cristal que será usado como clock. Fonte: Autores.

Em seguida, no menu Clock Configuration, foi definida a frequência de entrada em 24 MHz e selecionado o HSE como fonte do PLL (Phase-Locked Loop). O PLL foi configurado para fornecer um clock de 170 MHz para o HCLK, que será utilizado pelo microcontrolador em todas as suas operações. Detalhes na Figura 4.2.

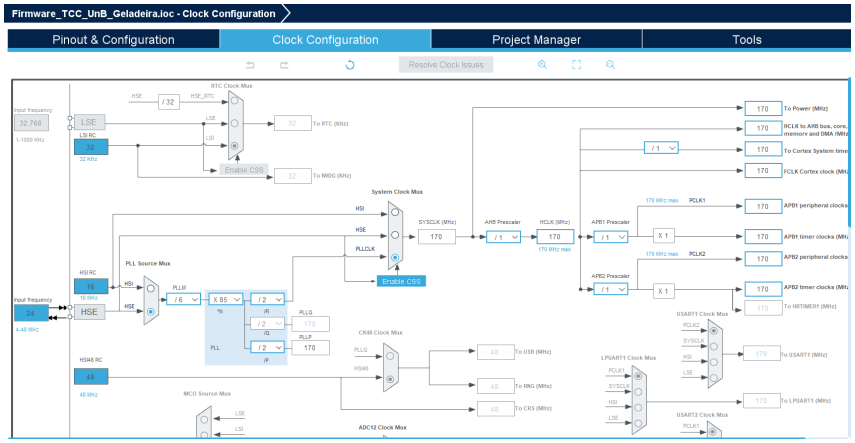


Figura 4.2 – Configuração de clock para o microcontrolador NUCLEO-G941RE. Fonte: Autores.

4.2.2 Configuração do Timer

O TIM1 (Advanced-control timer) foi habilitado para gerar os sinais PWM e seus complementares. Essa é uma das vantagens da utilização do microcontrolador STM32 para este projeto, pois o TIM1 permite a geração de sinais PWM sincronizados.

A configuração foi realizada acessando Timer > TIM1, e na opção TIM1 Mode and Configuration, selecionando:

Clock Source: Internal clock

Channel 1: PWM Generation CH1 CH1N

Channel 2: PWM Generation CH2 CH2N

Channel 3: PWM Generation CH3 CH3N

Com isso, foram habilitados os três canais PWM e seus respectivos sinais complementares, necessários para o acionamento dos IGBTs do chip do inversor de frequência. Figura 4.3.

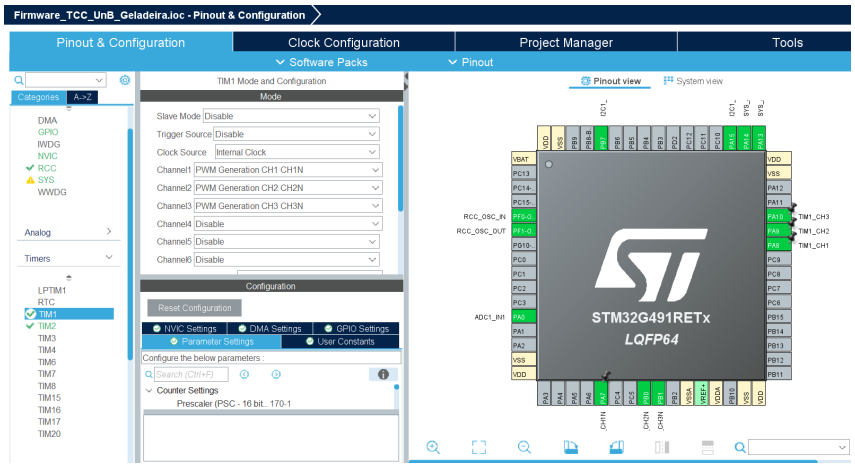


Figura 4.3 – Habilitação dos três canais PWM e seus complementares. Fonte: Autores.

4.2.3 Configuração da Frequência do PWM

A frequência do PWM foi definida em 10 kHz. Para configurar esse valor, foi ajustado o prescaler (PSC) e o período do contador (AutoReload Register):

Prescaler (PSC): 170 - 1 (reduzindo o clock de 170 MHz para 1 MHz)

Counter Period: 100 - 1 (configurando a frequência do PWM para 10 kHz, conforme a equação 1 MHz / 100 = 10 kHz). Detalhe na Figura 4.4.

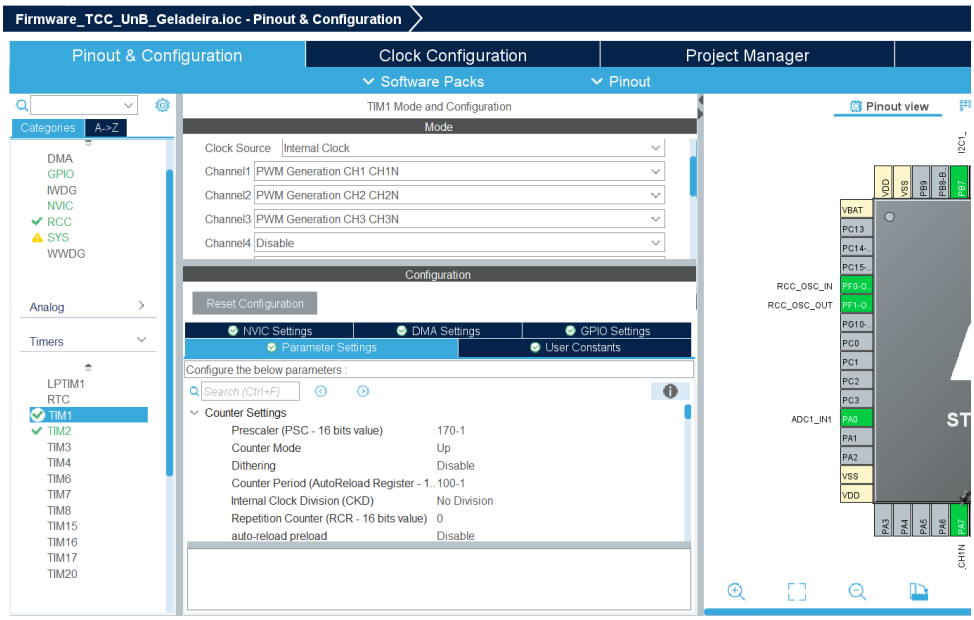


Figura 4.4 – Configuração da frequência do PWM. Fonte: Autores.

4.2.4 Configuração do Duty Cycle

Para cada canal PWM, foi definida a largura de pulso (duty cycle) inicial de 50%, garantindo que os sinais gerados fossem balanceados. As configurações foram realizadas para cada canal em:

TIM1 Mode and Configuration > Parameter Settings > PWM Generation Channel 1 and 1N > Pulse: 50

TIM1 Mode and Configuration > Parameter Settings > PWM Generation Channel 2 and 2N > Pulse: 50

TIM1 Mode and Configuration > Parameter Settings > PWM Generation Channel 3 and 3N > Pulse: 50

Conforme pode ser visto na Figura 4.5.

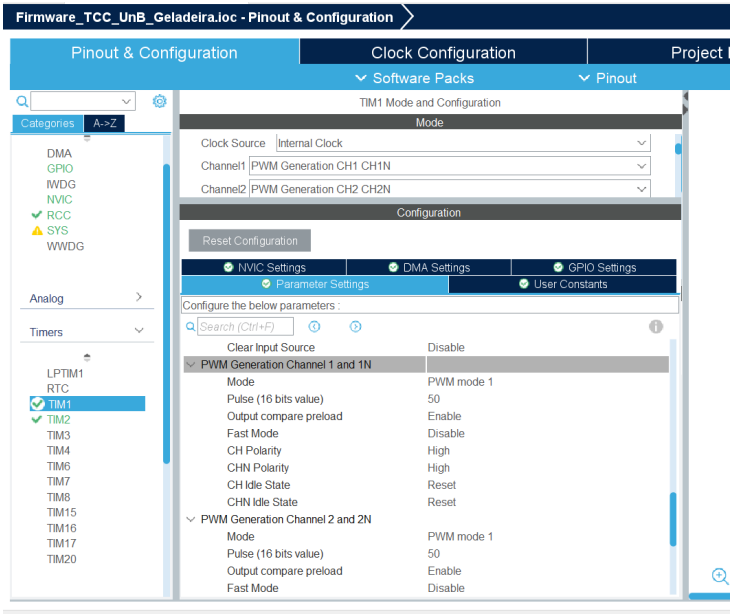


Figura 4.5 – Configuração do duty cicle para cada pulso PWM. Fonte: Autores.

4.2.5 Configuração do Dead Time

O Dead Time é um dos parâmetros mais importantes para evitar chaveamento simultâneo dos IGBTs de um mesmo canal. Para isso, foi inserido um dead time de 1 µs, configurado em: TIM1 Mode and Configuration > Parameter Settings > Break And Dead Time Management – Output Configuration > Dead Time: 149 (equivalente a 1 µs).

O valor de 1µs para o Dead Time foi atribuído baseado no tempo de chaveamento dos IGBTs utilizados nos ensaios e no protótipo final, onde para o IGBT do inversor SPCIT 1000-80-20 o IGBT usado pela fabricante SUPPLIER é o transistor LUH100G1201(LS Industrial Systems, 2024) que segundo datasheet, possui tempo tempo de subida e tempo de descida, respectivamente de 0.1µs e 0.585µs,respectivamente. Já o CI FSBB20CH60C no datasheet(ONSEMI, 2024) temos como tempo de subida e tempo de descida 0.75µs e 0.45µs, respectivamente. Logo o Dead Time de 1µs foi uma configuração adequada para todos dos testes e protótipo final.

Configuração pode ser vista na figura 4.6.

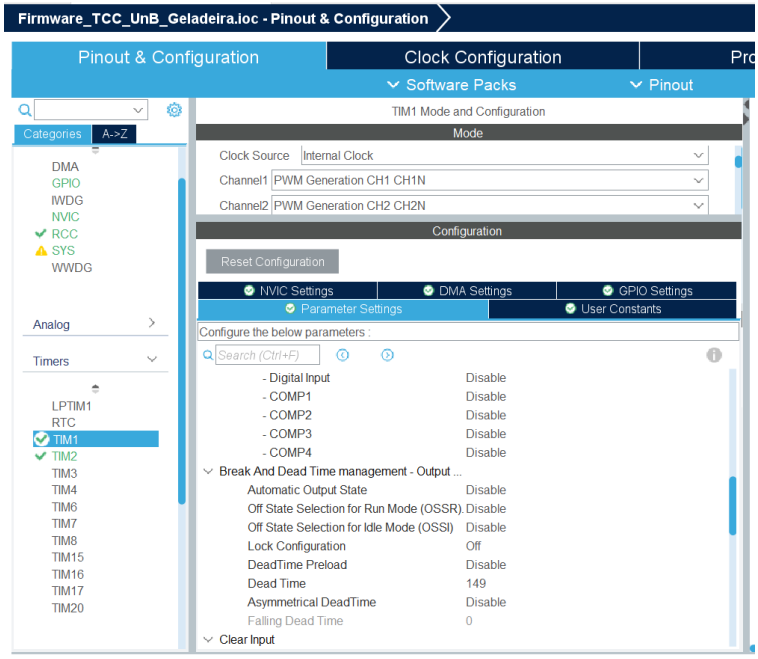


Figura 4.6 – Configuração do Dead Time. Fonte: Autores.

4.3 Implementação do código principal

Após finalizada a configuração gráfica no STM32CubeIDE, o código-fonte foi gerado automaticamente no arquivo main.c. Para inicializar os sinais PWM, foram adicionadas as seguintes linhas de código conforme a Figura 4.7.

```
177   HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
178   HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
179
180   HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
181   HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
182
183   HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3);
184   HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3);
```

Figura 4.7 – Inicializar os PWM para cada canal. Fonte: Autores.

Com essa implementação, os sinais PWM foram gerados conforme esperado.

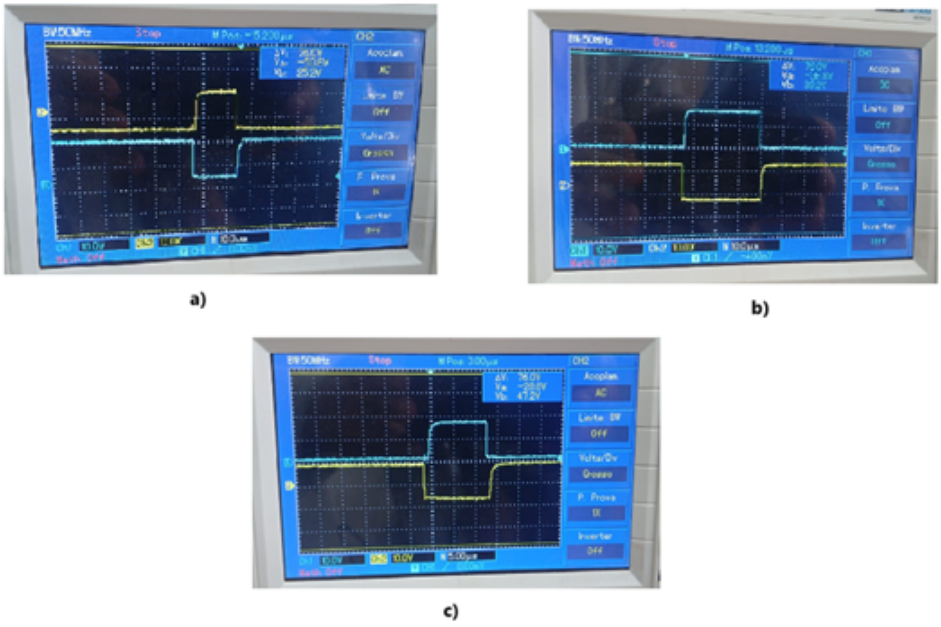


Figura 4.8 – Sinais PWM gerados pelo microcontrolador: a) Canal 1 e seu complementar; b) Canal 2 e seu complementar; e o c) Canal 3 e seu complementar. Fonte: Autores.

Na figura 4.9, em a) é possível visualizar os dois sinais para o canal 1, o principal e o complementar, ambos com frequência de 10KHz, e um duty cicle de 50%. Já na figura 19b e c, podemos comprovar o dead time de 1us que foi configurado no microcontrolador.

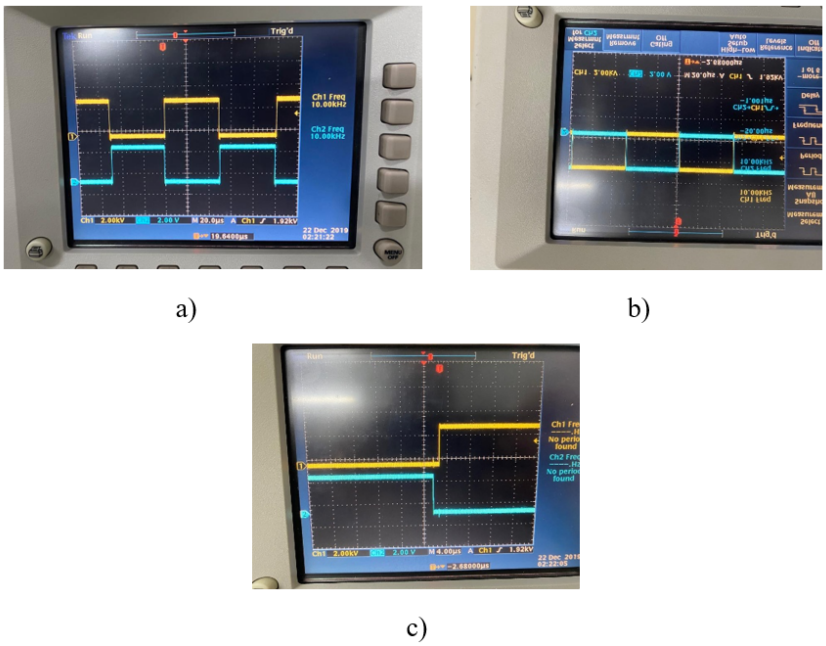


Figura 4.9 – Sinal PWM com frequência de 10KHz e dead time de 1us. Fonte: Autores.

4.4 Geração da Onda Senoidal Modulada (SPWM)

Para obter uma forma de onda senoidal de 60 Hz na saída do inversor, foi necessário inserir no código uma expressão matemática para gerar a modulação por largura de pulso senoidal (SPWM). A figura 4.10 podemos visualizar a parte do código onde basicamente é gerado o sinal SPWM. A atualização dos ângulos ocorre a cada interrupção do Timer 2 (TIM2), configurado para rodar a 10 kHz.

```
volatile float angulo1 = 0; //0° graus
volatile float angulo2 = 2.094; //120° x (pi/180)
volatile float angulo3 = 4.188; //240° x (pi/180)

//interrupção para entrar no timer2 a cada 10kHz
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
{
if(htim == &htim2)
{
        const float fator_escala = 0.83; //amplitude / 60Hz

        float incremento1 = (2.0f * M_PI * frequencia) /
num_pontos;//praticamente colocando a fórmula da senoide (wt)
        float incremento2 = (2.0f * M_PI * frequencia) / num_pontos;
        float incremento3 = (2.0f * M_PI * frequencia) / num_pontos;

        const float limite_angulo = 2.0f * M_PI; //limite 2*pi para evitar
estouro do ponto flutuante

        angulo1 = fmod(angulo1 + incremento1, limite_angulo);
        angulo2 = fmod(angulo2 + incremento2, limite_angulo);
        angulo3 = fmod(angulo3 + incremento3, limite_angulo);

        offset = 50 - amplitude;
        amplitude = frequencia * fator_escala;

        if(frequencia > 60) //amplitude, ou seja, a tensão não pode passar
dos 220V
        {
                amplitude = 50;
        }
```

Figura 4.10 – Código que gera o sinal SPWM. Fonte: Autores.

Passando esses sinais PWM num filtro RC, é possível visualizar as senoides de 60Hz para cada canal e seu complementar. Conforme a figura 4.11.

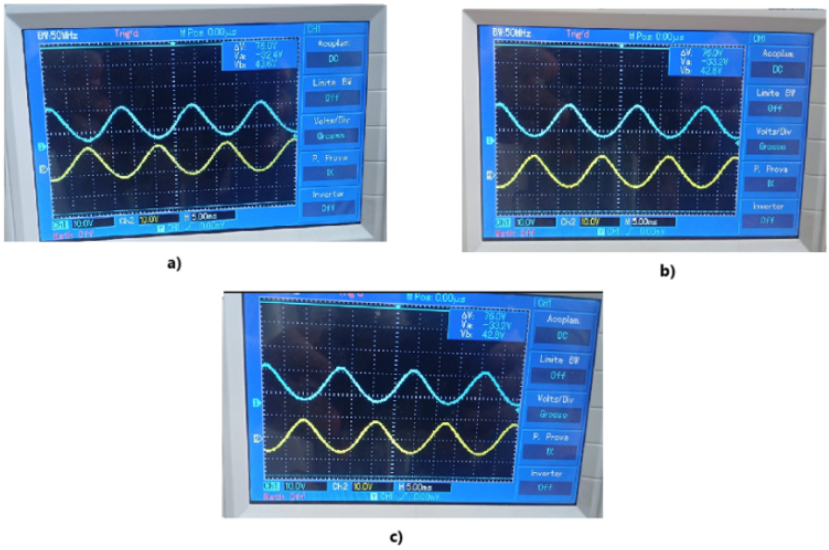


Figura 4.11 – Sinais PWM gerados pelo microcontrolador após filtro RC: a) Canal 1 e seu complementar; b) Canal 2 e seu complementar; e o c) Canal 3 e seu complementar. Fonte: Autores.

Na figura 4.12 temos os sinais SPWM do canal 1 e canal 2, onde ambos estão com defasagem de 120º conforme programação inicial do código para o microcontrolador.

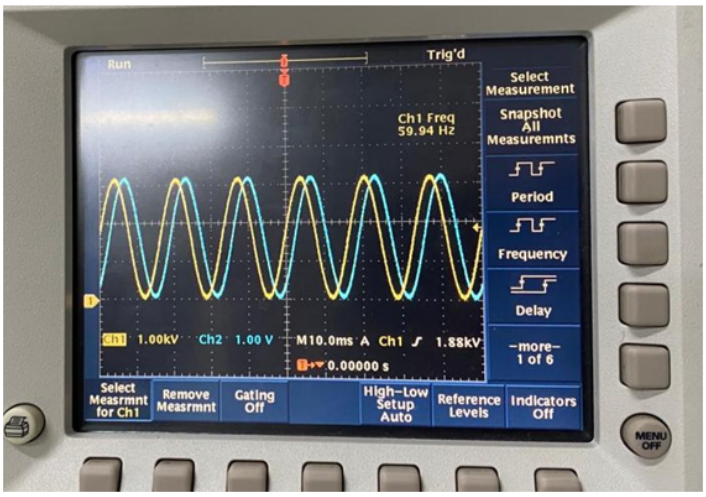


Figura 4.12 – Sinal SPWM do canal 1 e canal 2. Fonte Autores.

4.5 Controle de Frequência e Tensão

Para controlar a frequência do motor, foi inicialmente utilizado um potenciômetro, permitindo o ajuste manual da frequência e da tensão. Esse teste demonstrou que o sistema é capaz de alterar a frequência de operação do motor de forma suave e eficiente, conforme ilustrado na Figura 4.13.

Posteriormente, o potenciômetro foi substituído por um divisor de tensão, que gerava

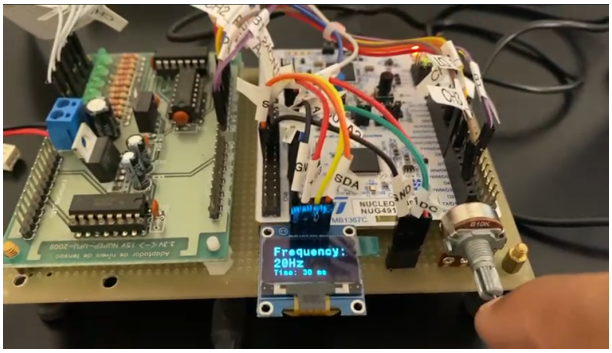


Figura 4.13 – Montagem do sistema com potenciômetro pra ajuste manual da frequência. Fonte: Autores.

uma tensão de 5V para a placa STM32. Essa tensão variava de acordo com a tensão de entrada, possibilitando o ajuste automático da frequência e da velocidade do motor. A Figura 4.14 apresenta o circuito do divisor de tensão utilizado.

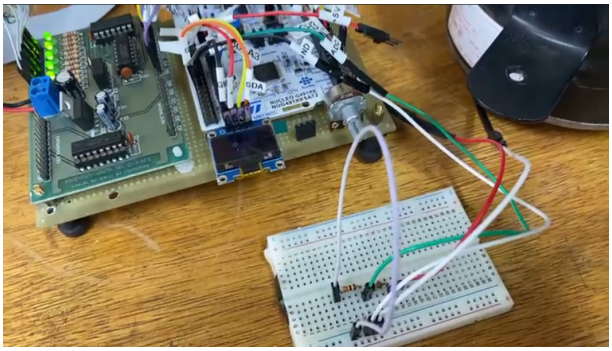


Figura 4.14 – Montagem do sistema com divisor de tensão substituindo o potenciômetro. Fonte: Autores.

4.6 Configuração do Motor

O motor utilizado possui duas bobinas: a bobina principal e a bobina de partida. A configuração do motor é feita com um neutro no pino central, onde uma das fases é conectada a uma extremidade de uma das bobinas e a outra fase à extremidade oposta, com a utilização de um capacitor que gera uma defasagem de 90°. Esse capacitor é fundamental para o correto funcionamento do motor.

Durante os testes, o motor foi alimentado com três saídas geradas pelo inversor: uma saída de referência com 0°e duas saídas defasadas em +90°e -90°, respectivamente. A saída de referência foi conectada ao pino central do motor, enquanto as saídas defasadas foram conectadas às extremidades das bobinas, conforme ilustrado na Figura 4.15.

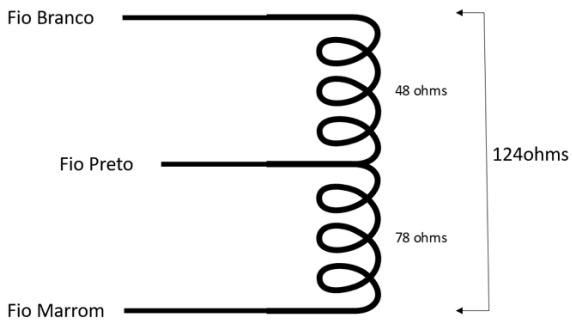


Figura 4.15 – Configuração das bobinas do motor utilizado. Fio preto referência, fio branco -90º de defasagem e fio marrom 90º de defasagem. Fonte: Autores.

4.7 Testes iniciais com o microcontrolador STM32G491RE e carga.

Para os testes iniciais antes de montar ou desenvolver a placa para este projeto, foi utilizado o Conjunto Inversor Trifásico SPCIT 1000-80-20 do fabricante SUPPLIER Indústria e Comércio de Eletro-Eletrônicos Ltda.



Figura 4.16 – SPCIT 1000-80-20 Módulo Inversor 3 Braços (10 kVA, 800 V, 20 kHz). Fonte: SUPPLIER

O SPCIT 1000-80-20 é um conjunto Inversor acoplado a três braços com IGBTs utilizando a topologia meia ponte. Cada braço é equipado com drivers DRO100D25A que contam com: isolação óptica, proteção contra curto-circuito através do monitoramento de VCE, intertravamento (interlock) com configuração de tempo morto e proteção contra subtensão na alimentação do secundário dos drivers.(SUPPLIER, 2024)

Tabela 4.1 – Dados técnicos conjunto SPCIT 1000-80-20

Descrição	Conjunto Inversor 3 braços
Modelo	SPCIT 1000-80-20
Tensão máxima de barramento	800 VCC + 10%
Frequência máxima de chaveamento	20 kHz
Potência Nominal	10 kVA
Tensão de Saída	0-380 VRMS(F-F)
Frequência de Saída	30-150 Hz
Corrente máxima de Saída	15,2 A @ 380 VF-F, Vcc= 800V, 10kHz 13,7 A @ 380 VF-F, Vcc= 800V, 15kHz 9,3 A @ 380 VF-F, Vcc= 800V, 20kHz
Ondulação da Corrente de Saída	24 Ap-p, Teste feito com L0= 560 µH, C0 = 5 µF, fs= 15 kHz.
Sobrecarga Máxima	100% por 1 segundo
Temperatura de operação do Termostato	90ºC, Tipo NF
Peso Aproximado	5,5 Kg
Dimensões Externas Máximas	Largura: 156 mm Altura: 164 mm Comprimento: 410 mm

A Figura 4.17 apresenta a corrente máxima em função da frequência para condições de tensão de barramento de 800V.

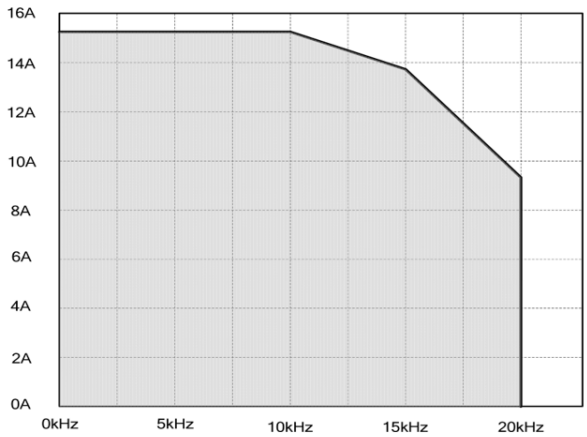


Figura 4.17 – Capacidade de corrente de saída em função da frequência de comutação e da tensão de barramento. Fonte: SUPPLIER

A Figura 4.18 apresenta os elementos Conjunto Inversor Monofásico de três braços.

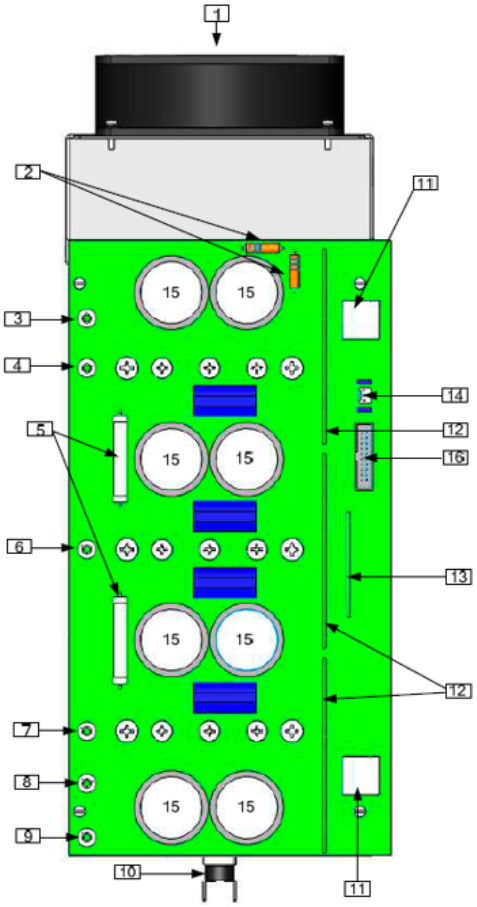


Figura 4.18 – Identificação dos elementos do conjunto. Fonte: SUPPLIER

Onde temos para cada item enumerado:

1- Ventilador ASA 12038DV-HB;

2- Resistores de leitura da tensão de barramento, 2x470kΩ – 3W;

3- Conector Neutro (N);

4- Conector de saída fase C;

5- Resistores de Barramento, 2x22kΩ – 10W;

6- Conector de saída fase B;

7- Conector de saída fase A;

8- Barramento CC negativo (E-);

9- Barramento CC positivo (E+);

10- Termostato;

11- Transformadores de pulso TRM480D20A;

12- Drivers DRO100D25A;

13- Fonte de driver DS320-08;

14- Alimentação circuitos internos;

15- Capacitores de Barramento, 8x470μF- 450 V (Eletrolítico);

16- Conector de Comando;

No conector IDCSC-24 (Figura 4.19), item 16 da Figura 4.18, estão agrupados todos os sinais de comando, monitoramento de erro e tensão assim como alimentações. Deve-se utilizar para conexão o conector L-24. A função de cada pino é descrita abaixo:

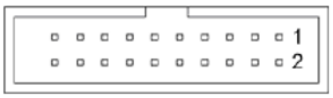


Figura 4.19 – Conector IDCSC-24. Fonte: SUPPLIER

Pino 1, 3 e 12: Alimentação +15 Vcc @ 1A;

Pino 2 e 4: Alimentação -15 Vcc @ 1A;

Pino 5 e 6: GND;

Pino 7: Sinal de comando do interruptor “S6” do braço C

Pino 8: Conectado ao barramento CC+ através de um resistor de 470 kΩ / 3 W;

Pino 9: Sinal de erro de driver do braço C (DRVc-err3);

Pino 10: Conectado ao barramento CC- através de um resistor de 470 kΩ / 3 W;

Pino11: Sinal de comando do interruptor “S5” do braço C;

Pino13: Sinal de comando do interruptor “S4” do braço B;

Pino14: Não conectado;

Pino15: Sinal de erro de driver do braço B (DRVb-err2);

Pino16: Sinal de comando do interruptor “S2” do braço A;

Pino17: Sinal de comando do interruptor “S3” do braço B;

Pino18: Sinal de erro de driver do braço A (DRVa-err1);

Pino19: Sinal de reset dos drivers (DRVa, DRVb, DRVc);

Pino20: Sinal de comando do interruptor “S1” do braço A;

Observação:

- Os pinos 1 e 3 são interligados entre si e com o pino 1 do conector de alimentação.

- Os pinos 2 e 4 são interligados entre si e com o pino 3 do conector de alimentação.

- Os pinos 5 e 6 são interligados entre si e com o pino 2 do conector de alimentação.

O conector PCMC2-03 (Figura 4.22), item 14 da Figura 4.18, é utilizado para fornecer alimentação aos circuitos internos do conjunto. Deve-se utilizar para conexão o conector PCF2-03. A função de cada pino é descrita em seguida.

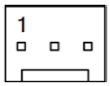


Figura 4.20 – Conector PCMC2-03. Fonte: SUPPLIER

Pino 1: Alimentação +15 V

Pino 2: GND

Pino 3: Alimentação -15 V

4.7.1 Drivers DRO100D25A

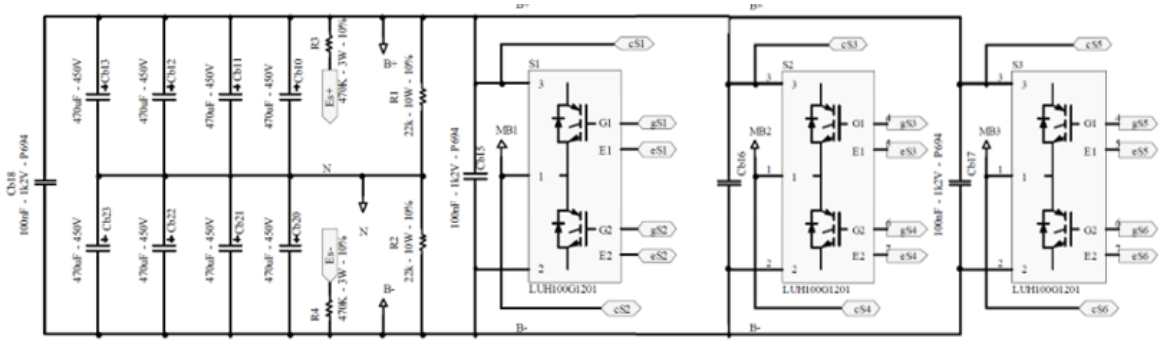
O conjunto SPCIT 1000-80-20 possui 3 drivers DRO100D25A responsáveis pelo acionamento dos IGBTs dos braços do inversor. Cada um desses drivers possui dois canais independentes e isolados, que tem capacidade de comutar a uma frequência de até 100 kHz. Os três drivers mencionados são alimentados por uma fonte chaveada modelo DS320-08A em conjunto com 2 transformadores de pulso modelo TRM480D20B. Para maiores detalhes, consulte o datasheet do driver no site www.supplier.ind.br.(SUPPLIER, 2024)

4.7.2 IGBTs

O conjunto SPCIT 1000-80-20 vem equipado com IGBTs de modelo LUH100G1201 fabricados pela empresa LS Industrial Systems. Estes IGBTs estão dispostos numa estrutura meia-ponte e tem capacidade de operar com tensão entre coletor e emissor de até 1200 V. Para maiores informações consulte o datasheet do fabricante.(SUPPLIER, 2024)

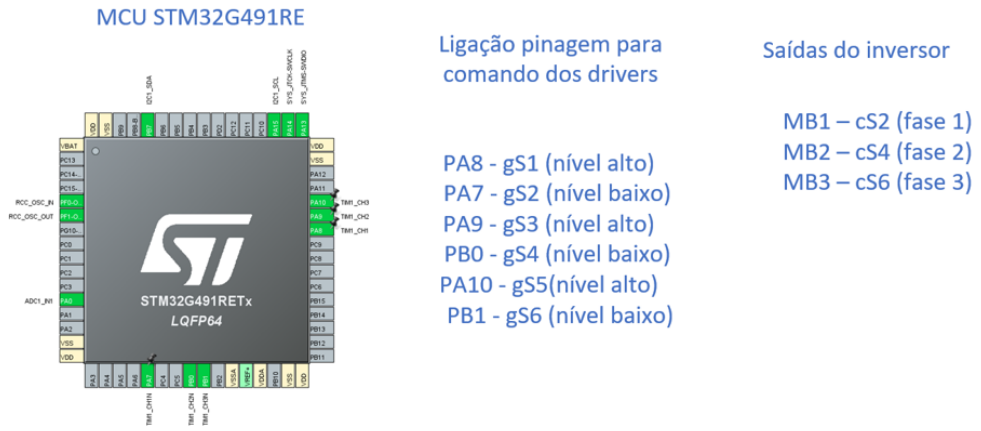
4.7.3 Capacitores de barramento

O conjunto SPCIT 1000-80-20 possui 8 capacitores (2 série x 4 paralelo) B43503 da marca EPCOS de 470uF e tensão máxima de 450V. Para maiores informações consulte o datasheet do fabricante.



a)

Figura 4.21 – Esquema inversor SPCIT 1000-80-20 a). Fonte: Autores.



b)

Figura 4.22 – Associação dos pinos de saída do MCU STM32G491RE b) com o inversor SPCIT a). Fonte: Autores.

Com a conclusão dos testes de todos os sinais de comando SPWM gerados pelo microcontrolador STM32G491RE, com a validação dos sinais com osciloscópio, conferido a frequência de 10KHz para o sinal PWM, e checado o tempo de dead time que é importante para que os dois níveis de cada braço do inversor não seja acionado ao mesmo tempo, iniciou-se a fase dos testes do inversor com uma carga na saída. Esta fase foi evoluindo aos poucos, seguindo uma ordem cronológica e de aumento de carga gradativamente até chegar no objetivo principal desse projeto que seria funcionar um compressor de uma geladeira doméstica. Para isso, os ensaio foram feito seguindo a seguinte sequência:

1- Teste do conjunto inversor SPCIT 1000-80-20 com kit de desenvolvimento acionando duas lâmpadas incandescente;

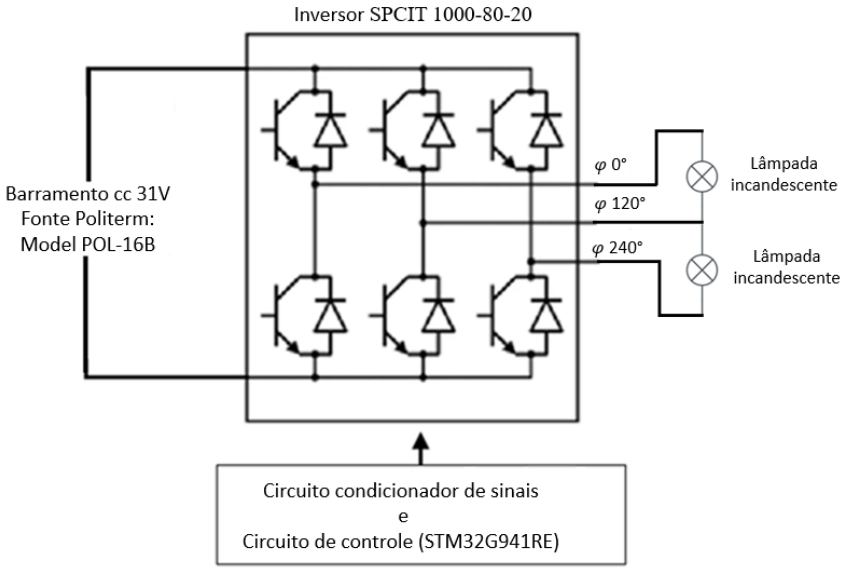


Figura 4.23 – Diagrama em bloco ensaio 1. Fonte: Autores.

2- Teste do conjunto inversor SPCIT 1000-80-20 com kit de desenvolvimento acionando um motor trifásico;

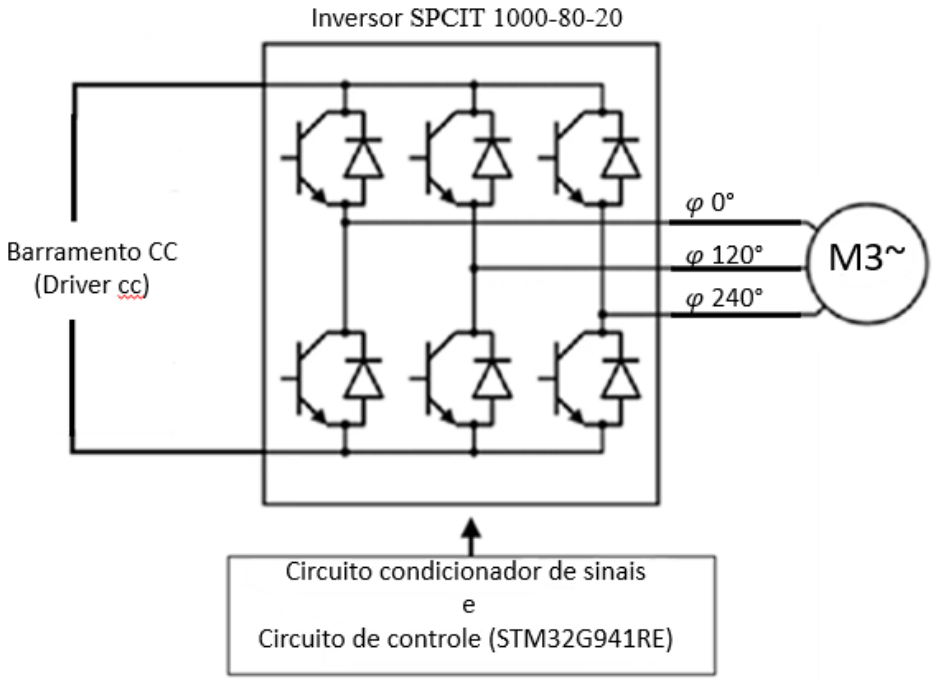


Figura 4.24 – Diagrama em bloco ensaio 2. Fonte: Autores

3- Teste do conjunto inversor SPCIT 1000-80-20 com kit de desenvolvimento acionando um motor bifásico;

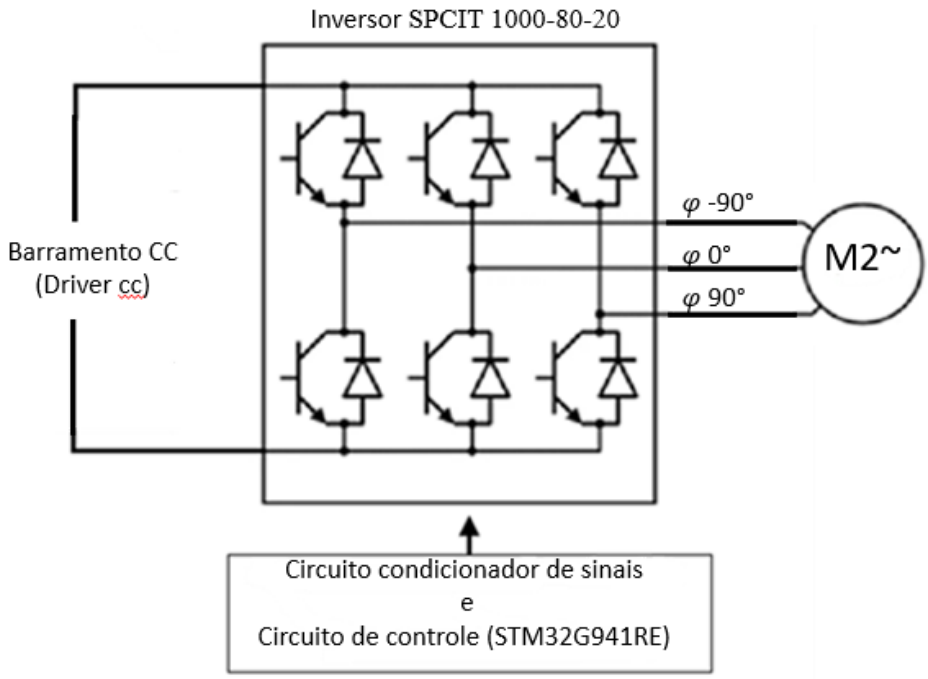


Figura 4.25 – Diagrama em bloco ensaio 3. Fonte: Autores.

4- Teste do conjunto inversor SPCIT 1000-80-20 com kit de desenvolvimento acionando um motor compressor de geladeira.

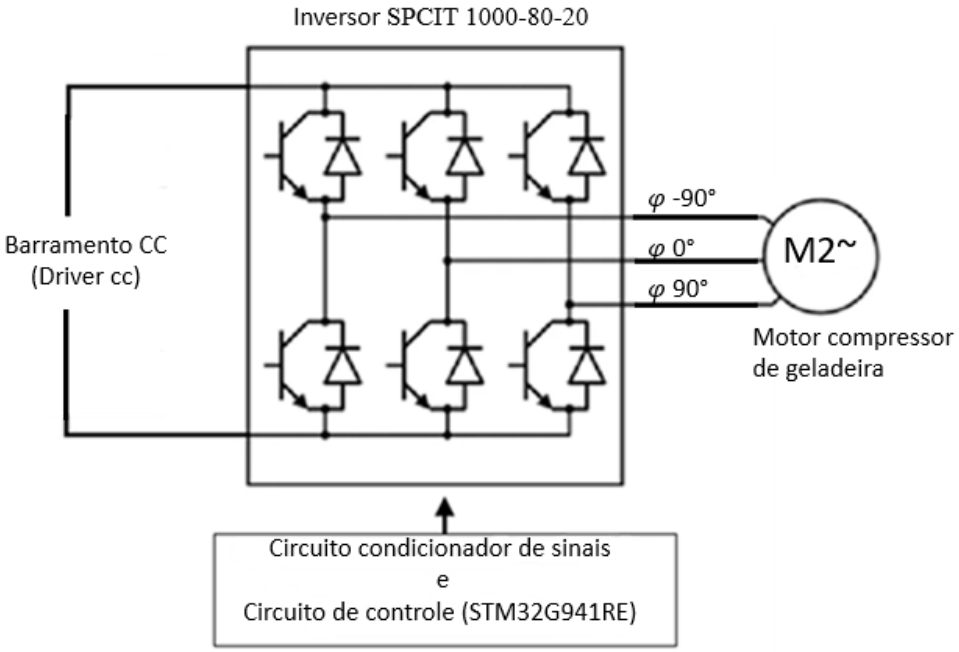


Figura 4.26 – Diagrama em bloco ensaio 4 (motor compressor de geladeira). Fonte: Autores.

Para início dos testes foi realizado a montagem de um kit de desenvolvimento (figura 4.29) composto por fonte de alimentação(Politerm: Model POL-16B), módulo adaptador de níveis de tensão (NUPEP-UFU) e a placa de desenvolvimento STM32G491RE. O módulo

adaptador de níveis de tensão foi desenvolvido pelo Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia no ano de 2009, com a finalidade de auxiliar as pesquisas quanto às conversões de níveis de tensão de sinais digitais entre os microcontroladores, que utiliza a tensão de 3,3 Vcc, e dispositivos eletrônicos que utilizam 15 Vcc, como os gatedrivers. Para este trabalho, o adaptador de níveis de tensão tem por objetivo adequar as tensões entre o STM32G491RE e o Gate Driver, ou seja, conversão de 3,3 Vcc para 15 Vcc, do PWM que aciona as chaves no inversor de frequência SPCIT 1000-80-20, A figura 4.27 temos o esquemático do módulo adaptador de níveis NUPEP-UFU.

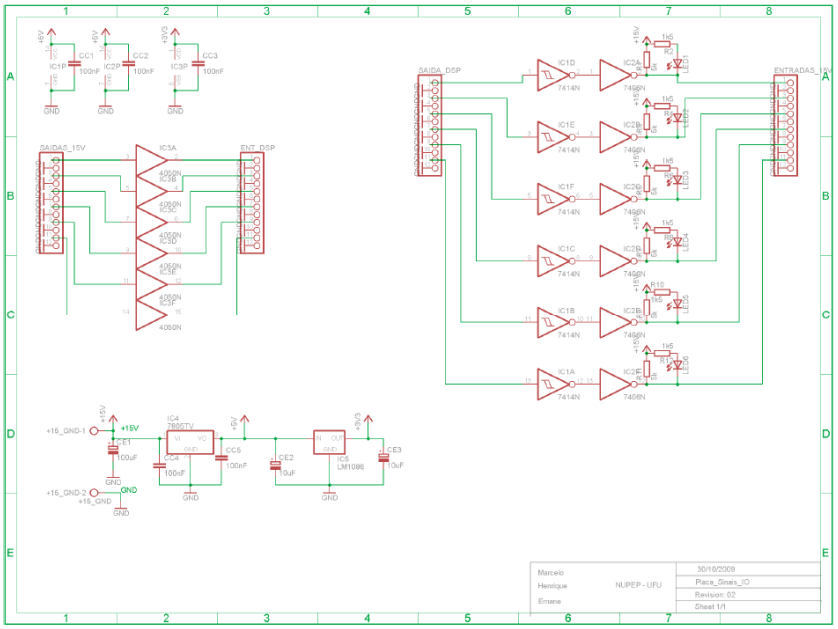


Figura 4.27 – Módulo Adaptador de Níveis de Tensão – 3,3V para 15V. Fonte: Projeto de Iniciação Científica – Aluno Marcelo Rodrigues da S. Brito.

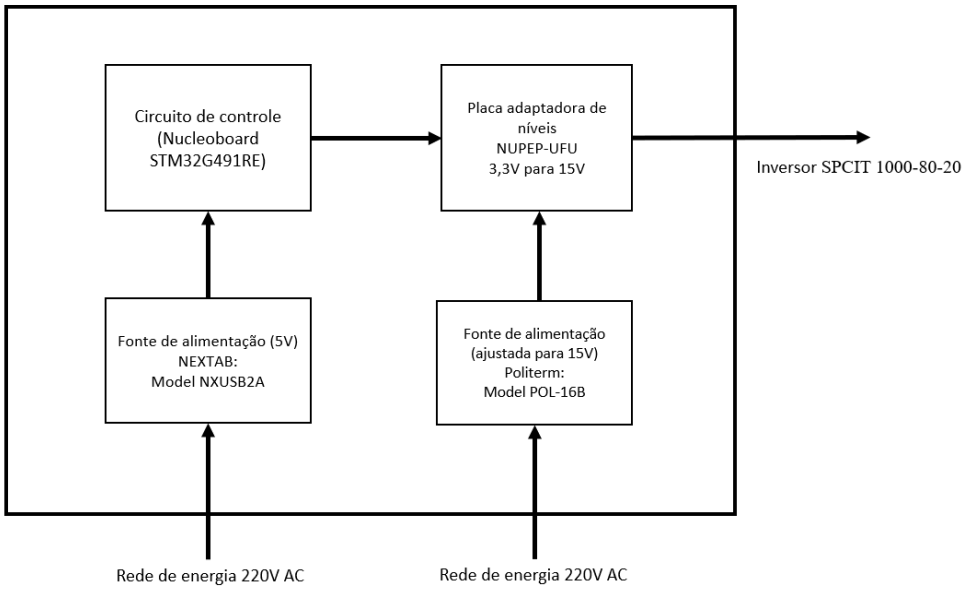


Figura 4.28 – Diagrama bloco do Kit de desenvolvimento. Fonte: Autores.

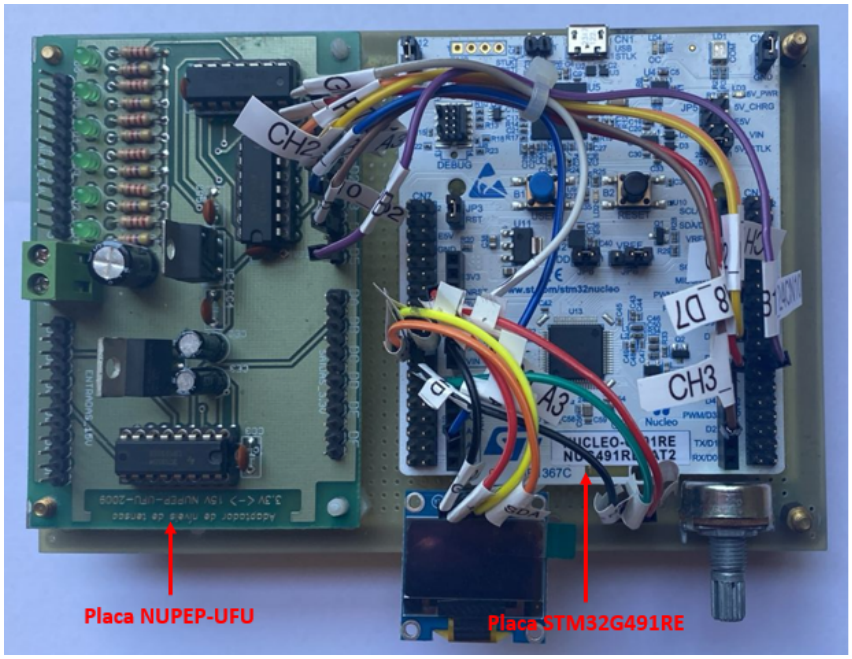


Figura 4.29 – Kit de desenvolvimento. Fonte: Autores.

Na figura 4.30 foi feito um ensaio inicial onde para tensão do barramento CC do inversor trifásico SPCIT 1000-80-20 foi usado uma tensão de 31V cc, e na saída foi usado como carga duas lâmpadas incandescentes, sendo uma entre as fases 1 e 2, e outra em as fases 2 e 3.

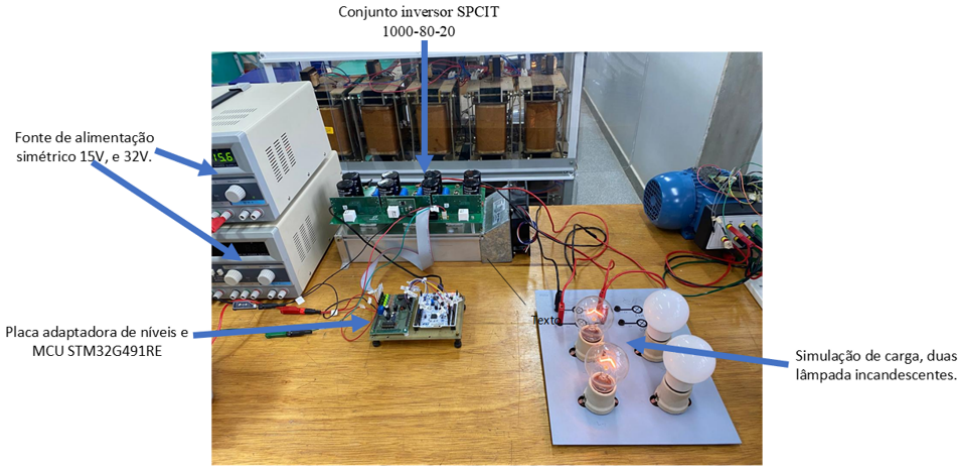


Figura 4.30 – Montagem inicial dos ensaios. Fonte: Autores.

Na figura 4.31 temos a representação do segundo ensaio, onde foi usado um motor trifásico, sendo acionado pelo inversor trifásico SPCIT 1000-80-20 que por sua vez foi comandando pelo microcontrolador STM32. Para esse ensaio foi utilizado um driver de tensão regulado para 148V cc, onde foi possível fazer o motor funcionar/girar normalmente. Cada fase do inversor estava configurada com uma defasagem de 120º uma da outra.

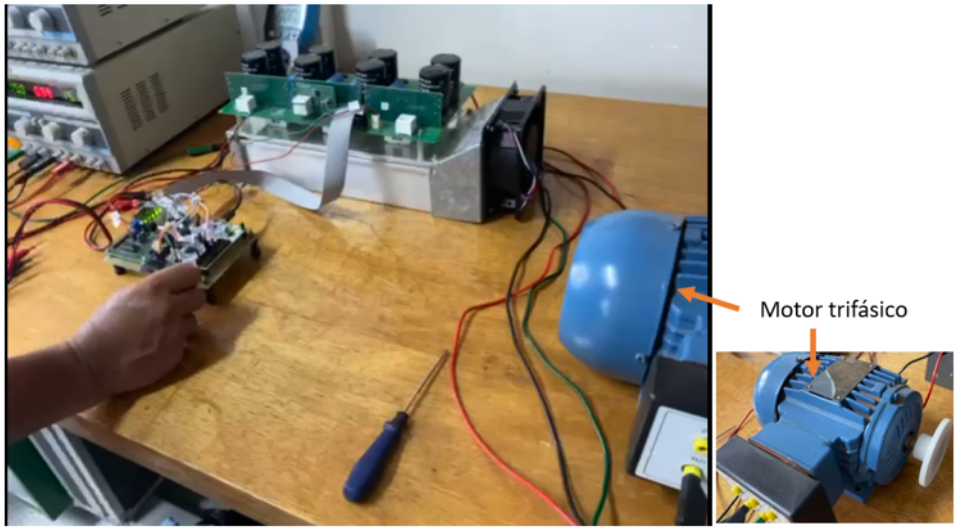


Figura 4.31 – Segundo ensaio usando motor trifásico como carga. Fonte: Autores

Numa terceira fase de ensaio, o objetivo foi fazer um motor monofásico ou bifásico, funcionar em a necessidade de capacitor ou relé de partida. Nesse terceiro ensaio foi usado um motor, modelo WEG 11409761, de ventilador de condensadora de ar-condicionado. Realizando as medidas do enrolamento do motor obteve-se a configuração da figura 4.32.



Figura 4.32 – Motor WEG 11409761 (a) e (b). Fonte: Autores.

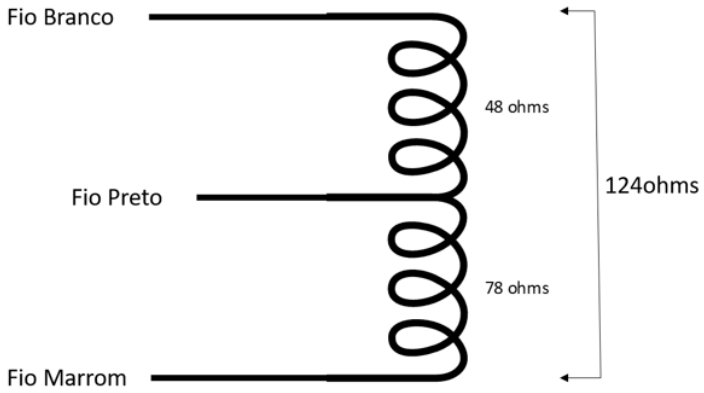


Figura 4.33 – Diagrama das medições feita no motor WEG 11409761. Fonte: Autores.

De acordo com a figura 4.32a, o capacitor deveria ser instalado entre os fios marrom e branco. Porém nesse terceiro ensaio o código no microcontrolador STM32G491RE foi alterado para que a fase 2 fosse referência com 0º, a fase 1 foi configurada para -90º de defasagem e a fase 3 foi configurada com 90º de defasagem. O código ficou conforme figura 4.34.

```
33 volatile float angulo1 = -1.570; //-90° graus
34 volatile float angulo2 = 0; //0° x (pi/180)
35 volatile float angulo3 = 1.570; //90° x (pi/180)
36
```

Figura 4.34 – Reconfiguração das fases 1, 2 e 3 no código do microcontrolador STM32G491RE. Fonte: Autores.

Após reconfigurado o microcontrolador STM32G491RE conforme figura 4.34, foi possível fazer o motor WEG 11409761 funcionar sem a necessidade do capacitor de partida

conforme figura 4.32b.

Um quarto ensaio foi realizado com um compressor de bebedouro de água elétrico, motor com funcionamento idêntico ao compressor usado em geladeiras domésticas.

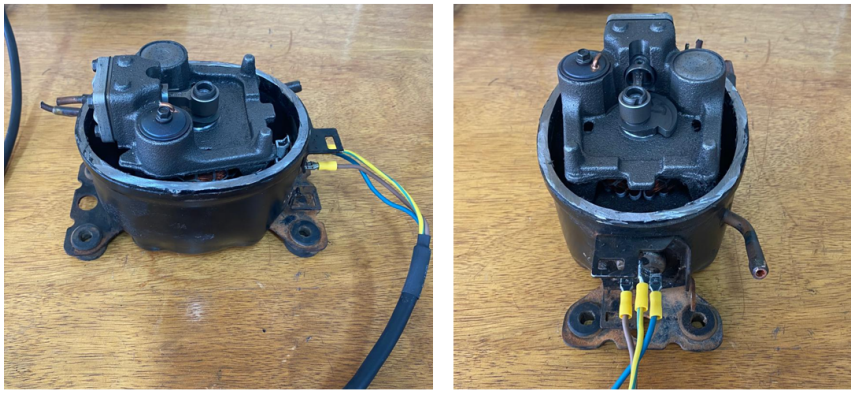


Figura 4.35 – Compressor de bebedouro de água elétrico. Fonte: Autores.

Na figura 4.35 observamos o compressor de bebedouro de água elétrico com a parte superior aberta onde foi possível percebermos o pistão funcionando normalmente com o inversor trifásico SPCIT 1000-80-20 sendo comandado pelo microcontrolador STM32G491RE.

A partir do segundo ensaio foi adicionado um display para visualizarmos a frequência (figura 4.37) de saída dos pulsos SPWM do microcontrolador, e um potenciômetro para simular a variação de frequência de acordo com a tensão do barramento cc (figura 4.36). E no quarto ensaio foi realizado a medida do tempo de execução (figura 4.39) do loop principal configurado no microcontrolador STM32G491RE, importante para poder otimizar o código de modo a se aproximar ao máximo do funcionamento analógico do sistema.

```
217  /*********************************************************************/
218  //Lógica para variar frequência de acordo com tensão no barramento(similar ao potenciômetro).
219  HAL_ADC_Start(&hadc1);
220  HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 100); //leitura analogica
221  adcpot = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
222  frequencia = 20 + adcpot * 0.009778; // (40Hz / 4095.Resolução)final com offset teremos 60Hz
223  HAL_ADC_Stop(&hadc1);
224  HAL_Delay(1);
225  atualizarFrequencia(frequencia);  // Atualiza o display com o novo valor
226
227  /*********************************************************************/
```

Figura 4.36 – Programação para leitura do potenciômetro/divisor de tensão. Fonte: Autores.

```
208  void atualizarFrequencia(int frequencia) {
209      char buffer[10];  // Buffer para armazenar o valor convertido
210      sprintf(buffer, "%dHz", frequencia);  // Converte a frequência para uma string
211      SSD1306_GotoXY (10,30);
212      SSD1306_Puts(buffer, &Font_11x18, 1);  // Exibe a string no display
213      SSD1306_UpdateScreen();  // Atualiza o display
214
215  }
```

Figura 4.37 – Progamação para leitura da frequência dos pulsos SPWM. Fonte: Autores.

```
240
241   // Calcula o tempo decorrido em milissegundos
242       elapsed_time_ms = end - start;
243
244   // Prepara a string para exibição
245       char time_buffer[30]; // Buffer para armazenar a string do tempo
246       sprintf(time_buffer, "Time: %lu ms", elapsed_time_ms);
247
248   // Exibe o tempo decorrido no display
249       SSD1306_GotoXY(10, 50);  // Ajuste a posição conforme necessário
250       SSD1306_Puts(time_buffer, &Font_7x10, 1);
251       SSD1306_UpdateScreen();  // Atualiza o display para exibir o valor
252   }
```

Figura 4.38 – Medida do tempo de execução do loop principal do código. Fonte: Autores.

Todos ensaios para simular a tensão fornecida pelo sistema fotovoltaico foi utilizado um driver de tensão cc, onde foi possível variar a tensão do barramento cc numa faixa de 0V a 254V cc.

4.8 Resultados Obtidos

Os testes demonstraram que o sistema foi capaz de controlar a velocidade e a frequência do motor de geladeira de maneira eficiente. A variabilidade da frequência foi validada pelo uso do divisor de tensão, e a operação do motor se mostrou estável e sem falhas.

4.9 Comportamento do Motor

Durante os testes, o controle de frequência permitiu uma aceleração suave e eficiente do motor, sem picos de corrente ou sobrecarga. A bobina de partida permaneceu em funcionamento contínuo, enquanto a bobina principal recebeu a tensão necessária para a operação estável do motor. O motor iniciou sua operação de forma eficiente, com a velocidade sendo ajustada conforme a variação da tensão de entrada, e a frequência alterando-se automaticamente.

As medições confirmaram a eficiência do sistema, demonstrando que o motor operou de forma estável e ajustou a frequência conforme as condições do sistema.

4.10 Desenvolvimento do circuito inversor de frequência usando CI FSBB20CH60C

Após toda validação do firmware desenvolvido com o microcontrolador STM32G491RE, o próximo passo foi montar um inversor de frequência usando chip FSBB20CH60C da empresa FAIRCHILD, atualmente ONSEMI. O circuito foi desenvolvido usando os dados do datasheet do CI FSBB20CH60C. O esquemático foi feito com base no exemplo da figura 4.37.

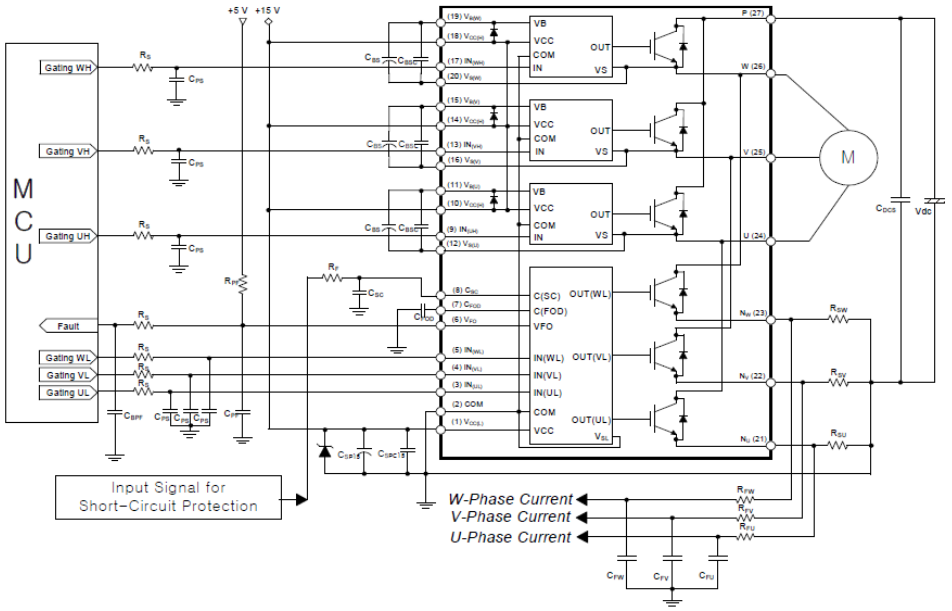


Figura 4.39 – Exemplo de aplicação usando CI FSBB20CH60C. Fonte: ONSEMI.

Com base no datasheet do FSBB20CH60C foram calculados os valores dos resistores, diodo zener e capacitores, chegando ao esquema da Figura 4.40. Onde nessa versão foi usado a placa de desenvolvimento STM32G491RE de forma externa, onde de acordo com a figura 4.40, os sinais de comando para o driver e IGBTs estariam passando pelo conector J1 e J3, a alimentação de 15V cc para os drivers passaria pelo J4 e tensão do barramento cc de entrada passaria pelo J5.

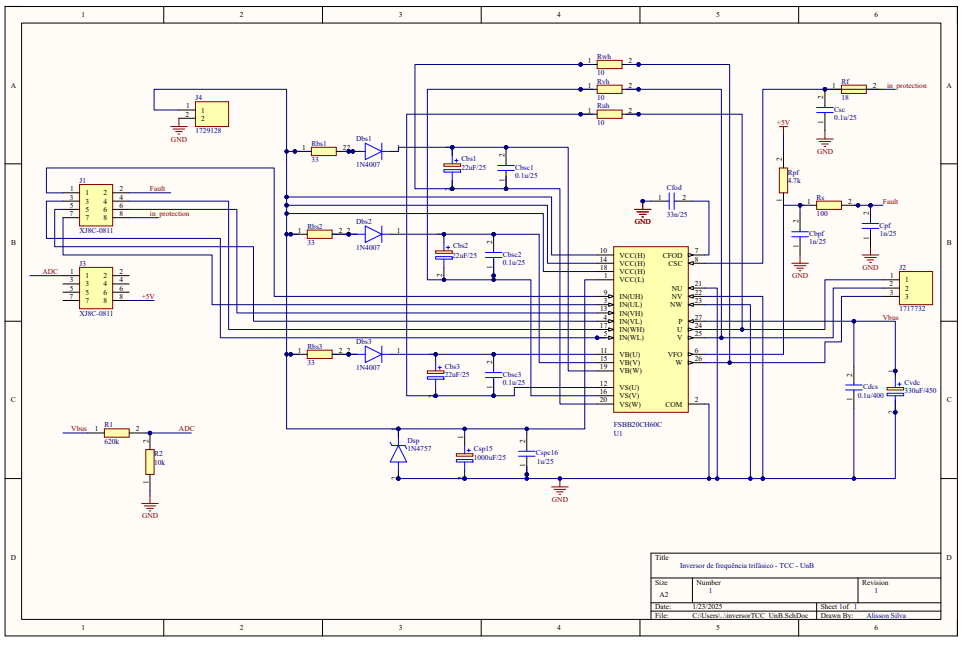


Figura 4.40 – Esquemático inversor CI FSBB20CH60C. Fonte: Autores.

Com o esquema pronto foi fabricada a placa do circuito (PCB). A Figura 4.41 ilustra a PCB.

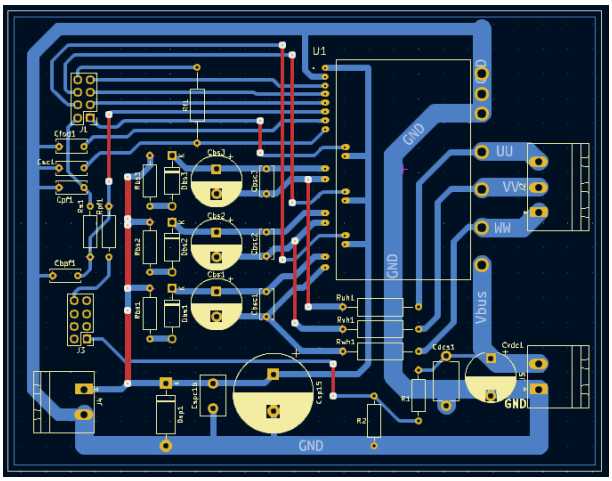


Figura 4.41 – Diagrama PCB geladeira solar. Fonte: Autores.

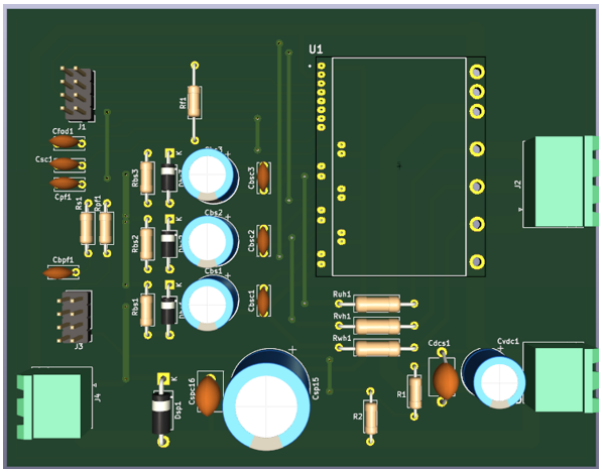


Figura 4.42 – Placa vista 3D Geladeira solar. Fonte: Autores.

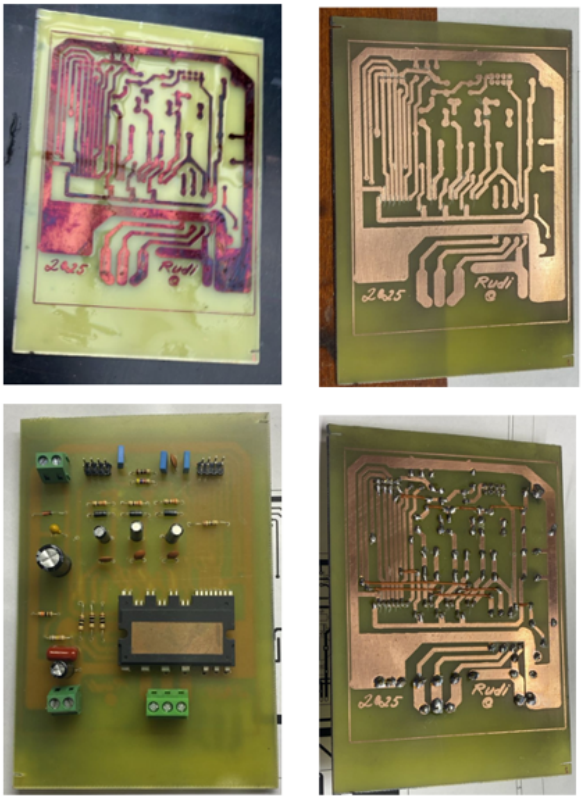


Figura 4.43 – Placa inversora Geladeira solar (SOLOGEL). Fonte: Autores.

Após toda placa montada, foi feita a integração com o driver cc que simula o arranjo fotovoltaico, ligação com o kit de desenvolvimento e o motor compressor de geladeira. Todos os sinais de comandos PWM estavam presentes, alimentações dos drivers do inversor, bem como a tensão do barramento cc, e ao ligar todo sistema foi possível verificar o funcionamento da placa com o CI inversor FSBB20CH60C, validando assim todas as fases do projeto até o resultado final do protótipo do dispositivo eletrônico para acionamento de geladeira domésticas.

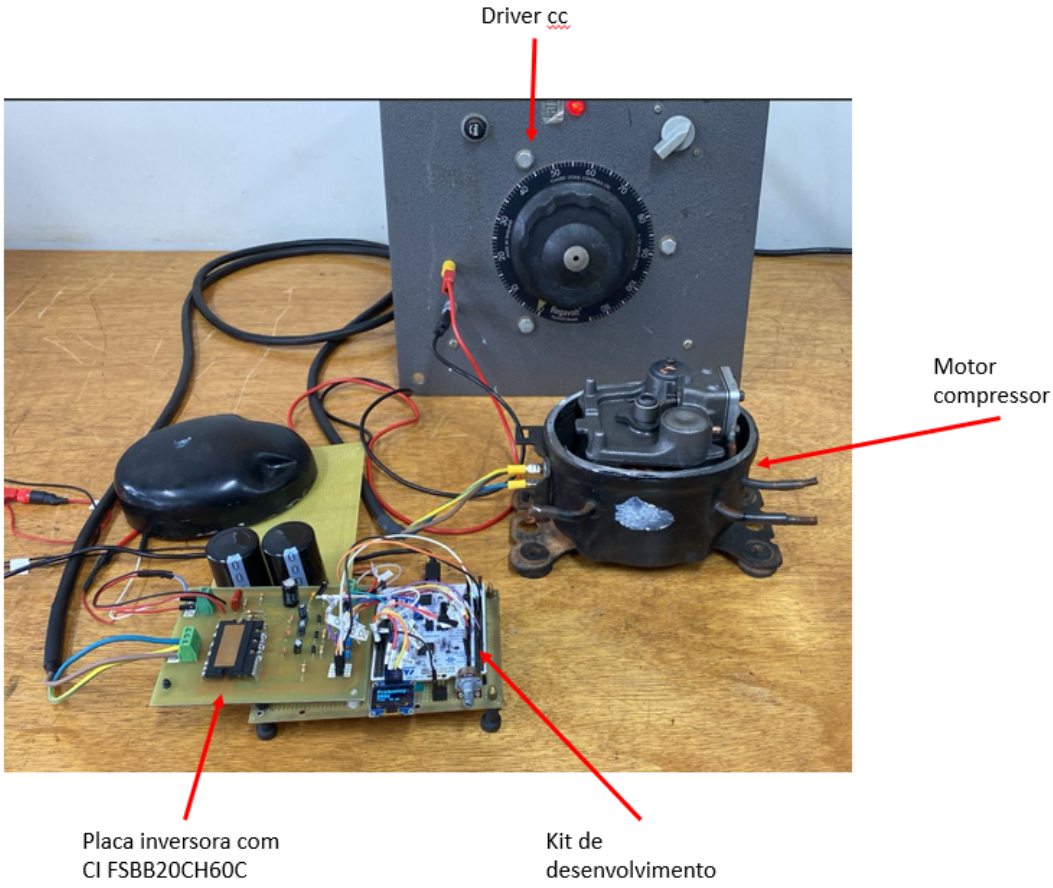


Figura 4.44 – Sistema completo com a placa do circuito inversor desenvolvida durante o projeto. Fonte: Autores.

5 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um dispositivo eletrônico capaz de adaptar geladeiras convencionais para operar diretamente com energia solar fotovoltaica, sem a necessidade de baterias. O sistema foi projetado com base em um inversor controlado por microcontrolador STM32 e otimizado para garantir o acionamento eficiente do compressor de forma autônoma.

Na primeira fase do projeto, foram realizados estudos teóricos e simulações no software PSIM para validar o funcionamento do sistema. No decorrer do TCC 2, a implementação do protótipo foi conduzida com testes experimentais, permitindo a análise do desempenho real do sistema em condições práticas.

Os testes experimentais demonstraram que a estratégia de controle adotada permite o funcionamento eficiente do motor do compressor em função da disponibilidade de energia solar, eliminando a necessidade de baterias e otimizando o consumo energético. No entanto, desafios como variações bruscas de irradiância solar e a necessidade de ajustes no controle PWM ainda requerem refinamento para garantir maior estabilidade e confiabilidade ao sistema.

5.1 Planilha de custos do projeto

Tabela 5.1 – Lista de Materias (BOM)

Tipo	Valor	Serigrafia na placa	Quantidade	Valor R$
Capacitor	1nF/35	Cbpf,Cpf	2	0,64
Capacitor Eletrolítico	22uF/25	Cbs1,Cbs2,Cbs3	3	0,65
Capacitor	0.1uF/25	Cbsc1,Cbsc2,Cbsc3,Csc	4	0,53
Capacitor	0.1uF/400	Cdcs	1	0,53
Capacitor	33nF/25	Cfod	1	0,33
Capacitor Eletrolítico	1000uF/25	Csp15	1	0,62
Capacitor	1uF/25	Cspc16	1	1,1
Capacitor Eletrolítico	0.1uF/400	Cvdc	1	23
Diodo Zener	1N4757	Dsp	1	0,61
Diodo	1N4007	Dbs1,Dbs2,Dbs3	3	0,3
Conector	XJ8C0811	J1, J3	2	3,15
Conector	1717732	J2	1	1
Conector	1729128	J4, J5	2	0,8
Resistor	620k	R1	1	0,12
Resistor	10k	R2	1	0,05
Resistor	18	Rf	1	0,04
Resistor	4.7k	Rpf	1	0,05
Resistor	100R	Rs	1	0,05
Resistor	10R	Ruh, Rvh, Rwh	3	0,05
Resistor	33R	Rbs1, Rbs2, Rbs3	3	0,05
Placa Fenolite 15x25		Placa circuito impresso	1	20,16
FSBB20CH60C	CI	U1	1	30,69
STM32G491RE	MCU		1	136,59
		Total(compentes)	37	
		Total(Valor R$)		**221,11**

A Tabela 5.1 apresenta os custos exatos dos componentes necessários para o projeto, conforme os dados da planilha.

Comparando com o custo de um inversor pronto disponível no mercado comercial, como por exemplo, o Inversor de Frequência WEG CFW300 1,5cv 6A 220V Mono/Tri que custa R$ 1.410,00 (disponível na loja virtual ASG Automação Industrial) o produto desenvolvido neste trabalho com um custo de R$ 221,11 representa uma economia significativa. Essa redução se deve à seleção otimizada de componentes e ao desenvolvimento de um projeto eficiente, sem a necessidade de baterias.

O projeto continua sendo uma solução viável e sustentável, ideal para comunidades remotas e locais com acesso limitado à rede elétrica.

Portanto, o dispositivo proposto apresenta uma alternativa mais viável economicamente, tornando-se uma solução acessível e eficiente para comunidades remotas ou em regiões com

infraestrutura elétrica limitada.

5.2 Dificuldades Encontradas

Durante a fase experimental, foram observadas algumas dificuldades, como a adaptação do controle do inversor às variações dinâmicas da irradiância solar. Além disso, a integração entre o microcontrolador STM32 e o módulo inversor exigiu ajustes no firmware para otimizar a modulação PWM e minimizar perdas no acionamento do motor.

5.3 Trabalhos Futuros

Para aprimoramento do sistema, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Implementação de algoritmos avançados de controle, como MPPT dinâmico, para maximizar a eficiência energética.

- Avaliação do uso de supercapacitores como solução complementar para amortecer flutuações na potência de entrada. - Estudo da viabilidade de integração com outras fontes renováveis, como energia eólica, para complementar o suprimento energético.

- Análise do impacto da tecnologia proposta no mercado, considerando custos de produção e possíveis adaptações para comercialização.

5.4 Considerações Finais

O desenvolvimento deste projeto contribui significativamente para a viabilidade de soluções sustentáveis na área de refrigeração, especialmente para regiões remotas sem acesso à rede elétrica. A validação experimental do sistema demonstra que é possível operar uma geladeira convencional apenas com energia solar, reduzindo custos operacionais e promovendo a independência energética.

A equipe de desenvolvimento agradece ao professor Rudi Henri Van Els pelo suporte técnico e pela disponibilização de equipamentos essenciais para a implementação dos testes experimentais. O conhecimento adquirido ao longo deste trabalho abre novas possibilidades para futuras inovações no setor de refrigeração solar.

Referências

ANDREWS, T. Vapor compression systems: Design and optimization. **Refrigeration Science**, v. 12, n. 1, p. 200–210, 2011. Citado na p. 22.

AXAOPOULOS, P.; OTHERAUTHORS, A. Title of the article. **Journal Name**, v. 12, n. 3, p. 123–130, 2009. Citado nas pp. 38 e 40.

BLAS, M. D.; APPELBAUM, J.; TORRES, L.; GARCíA, A.; PRIETO, E.; ILLANES, R. A refrigeration facility for milk cooling powered by photovoltaic solar energy. **Progress in Photovoltaics**, v. 11, p. 467–479, 2010. Citado na p. 38.

BLAS, M. D.; APPOINTMENTS, J. Title of the article. **Journal Name**, v. 5, n. 4, p. 123–130, 2003. Citado na p. 39.

CHOWDHURY, A. Advances in refrigeration systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 78, p. 45–56, 2017. Citado na p. 33.

CLARK, J. Compression refrigeration technologies: Current trends. **Refrigeration and Air Conditioning**, v. 15, n. 3, p. 100–110, 2009. Citado na p. 22.

COSTA, M. R. Tipos de sistemas de refrigeração solar. **Revista de Tecnologia**, v. 15, n. 2, p. 100–110, 2012. Citado na p. 21.

CRUZ, A. Innovations in refrigeration systems. **Refrigeration Science and Technology**, v. 99, p. 200–210, 2021. Citado na p. 34.

DAVIS, R. Domestic refrigeration: A review. **Journal of Domestic Appliances**, v. 18, p. 250–260, 2012. Citado na p. 22.

DRIEMEIER, C.; ZILLES, R. An ice machine adapted into an autonomous photovoltaic system without batteries using a variable-speed drive. **Progress in Photovoltaics**, v. 18, p. 467–479, 2010. Citado na p. 39.

DRIEMEIER, L.; ZILLES, R. Sistema de produção de gelo solar. **Journal of Renewable Energy**, v. 35, n. 4, p. 234–245, 2010. Citado na p. 39.

EVANS, T. Evaporation processes in refrigeration. **Refrigeration Science and Technology**, v. 11, p. 90–100, 2015. Citado na p. 23.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS., S. D. **Electric machinery**. New York, USA: McGraw-Hill, 2014. 687 p. Citado na p. 29.

GONZALEZ, M. Sustainable refrigeration technologies: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 123–134, 2018. Citado na p. 34.

GREEN, J. Recent advances in refrigeration technology. **Journal of Thermal Science**, v. 15, p. 200–210, 2020. Citado na p. 32.

JACKSON, P. Innovations in refrigeration: A focus on energy efficiency. **Energy Reviews**, v. 22, p. 150–160, 2013. Citado na p. 23.

JACKSON, P. Innovations in refrigeration: A focus on energy efficiency. **Energy Reviews**, v. 22, p. 150–160, 2013. Citado na p. 28.

JOHNSON, L. Absorption refrigeration systems. **Journal of Refrigeration**, v. 10, n. 1, p. 50–60, 2005. Citado na p. 21.

KHAN, M. Advances in refrigeration technology. **Journal of Thermal Science**, v. 45, n. 3, p. 310–320, 2018. Citado na p. 37.

LEE, J. Compression refrigeration systems: Efficiency improvements. **Energy Efficiency**, v. 5, p. 50–60, 2007. Citado na p. 22.

LS Industrial Systems. **LUH100G1201**. [*S.l.*], 2024. Disponível em: https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/LSIS/LUH100G1201/pdf.php?id=799502. Acesso em: 20 fev. 2025. Citado na p. 55.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA**. [*S.l.*]: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2008. Citado nas pp. 34, 35 e 36.

MILLER, A. Performance analysis of refrigeration systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 33, n. 5, p. 1000–1010, 2010. Citado na p. 22.

MOUSSA, A. Innovative refrigeration solutions for sustainability. *In*: **Proceedings of the International Conference on Sustainable Refrigeration**. [*S.l.*: *s.n.*], 2019. p. 85–92. Citado nas pp. 33 e 37.

ONSEMI. **FSBB20CH60C**. [*S.l.*], 2024. Disponível em: https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fsbb20ch60c-d.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024. Citado nas pp. 48 e 55.

PEDERSEN, P. H.; POULSEN, S.; KATIC, I. Solarchill - a solar pv refrigerator without battery. *In*: **EuroSun 2004 Conference**. [*S.l.*: *s.n.*], 2004. Citado nas pp. 38 e 41.

RODRIGUEZ, M. Absorption refrigeration technology: A review. **Journal of Applied Thermodynamics**, v. 11, n. 4, p. 300–310, 2008. Citado na p. 22.

SILVA, A. B.; OUTROS. Estudo sobre a refrigeração em sistemas solares. **Revista de Energia Renovável**, v. 12, p. 123–135, 2010. Citado na p. 21.

SMITH, J. Innovations in refrigeration technology. **Energy and Environment**, v. 20, n. 3, p. 200–210, 2014. Citado na p. 21.

STMicroelectronics. **STM32CubeIDE**. [*S.l.*], 2024. Disponível em: https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html#. Acesso em: 12 set. 2024. Citado na p. 47.

STMicroelectronics. **STM32G491RE**. [*S.l.*], 2024. Disponível em: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g491re.html#. Acesso em: 12 set. 2024. Citado nas pp. 9, 45 e 46.

SUPPLIER. **CONJUNTO INVERSOR TRIFÁSICO SPCIT 1000-80-20-FH00**. [*S.l.*], 2024. Disponível em: https://www.supplier.ind.br/produto/conjuntos-inversores-de-potencia/5/conjunto-inversor-trifasico-spcit-1000-80-20-fh00/392. Acesso em: 20 set. 2024. Citado nas pp. 61 e 65.

TURNER, H. Expansion devices in refrigeration systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 37, p. 200–210, 2014. Citado na p. 23.

H. L. Wilson. **Motor Starting with Starting Capacitor**. 1943. US2338727A. Citado na p. 30.

Apêndices

Apêndice A – Código firmware para o STM32G491RE

A.1 Código final implentado para o STM32G491RE

Código A.1 – Código principal em C

```
/* Firmware TCC_UnB_2024/2 */
/* Engenharia eletr nica - Alisson Ferreira da silva */
/*                         Gilberto Gonçalves Pereira */
/* Dispositivo Eletr nico para Adaptação de Geladeiras a */
/* Sistema de Energia Solar Fotovoltaico Dedicado */

/* USER CODE BEGIN Header */
/**
  ******************************************************************
  * @file           : main.c
  * @brief          : Main program body
  ******************************************************************
  * @attention
  *
  * Copyright (c) 2024 STMicroelectronics.
  * All rights reserved.
  *
  * This software is licensed under terms that can be found in the LICENSE file
  * in the root directory of this software component.
  * If no LICENSE file comes with this software, it is provided AS-IS.
  *
  ******************************************************************
  */
/* USER CODE END Header */
/* Includes ------------------------------------------------------------------*/
#include "main.h"

/* Private includes ----------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN Includes */

#include "math.h"
#include "ssd1306.h"

volatile uint16_t amplitude; //Metade da resolução do PWM (50)
volatile float frequencia = 0; //Valor inicial de 0Hz
const uint16_t num_pontos = 10000; //Refere-se diretamente a freq do PWM(10kHz)
```

```
37 volatile float angulo1 = -1.570; //-90   graus
38 volatile float angulo2 = 0; //0   x (pi/180)
39 volatile float angulo3 = 1.570; //90   x (pi/180)
40 int16_t offset;
41 uint16_t pulso1, pulso2, pulso3; // sinais enviados para o pwm.
42 uint8_t inversao_rotacao = 0; //sentido de rotação
43 uint32_t adcpot; // variável para usar potenci metro ou o divisor de
       tensão
44 uint32_t start, end;       // Variáveis para armazenar o tempo em ms
45 uint32_t elapsed_time_ms;  // Variável para o tempo decorrido em ms
46 uint16_t protecao = 0; //Variáveis controle de proteção e falha.
47 uint16_t falha; //Variáveis controle de falha CI FSBB20CH60C.
48
49 /* USER CODE END Includes */
50
51 /* Private typedef
       -----------------------------------------------------------*/
52 /* USER CODE BEGIN PTD */
53 /* USER CODE END PTD */
54
55 /* Private define
       ------------------------------------------------------------*/
56 /* USER CODE BEGIN PD */
57 /* USER CODE END PD */
58
59 /* Private macro
       -------------------------------------------------------------*/
60 /* USER CODE BEGIN PM */
61 /* USER CODE END PM */
62
63 /* Private variables
       ---------------------------------------------------------*/
64 ADC_HandleTypeDef hadc1;
65 I2C_HandleTypeDef hi2c1;
66 TIM_HandleTypeDef htim1;
67 TIM_HandleTypeDef htim2;
68
69 /* USER CODE BEGIN PV */
70 /* USER CODE END PV */
71
72 /* Private function prototypes
       -----------------------------------------------*/
73 void SystemClock_Config(void);
74 static void MX_GPIO_Init(void);
75 static void MX_TIM1_Init(void);
76 static void MX_TIM2_Init(void);
77 static void MX_I2C1_Init(void);
78 static void MX_ADC1_Init(void);
79 /* USER CODE BEGIN PFP */
80 /* USER CODE END PFP */
81
82 /* Private user code
       ---------------------------------------------------------*/
```

```
83 /* USER CODE BEGIN 0 */
84
85 //interrupção para entrar no timer2 a cada 10kHz
86 void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
87 {
88 if(htim == &htim2)
89 {
90   const float fator_escala = 0.83; //amplitude / 60Hz
91
92   float incremento1 = (2.0f * M_PI * frequencia) /
       num_pontos;//praticamente colocando a fórmula da senoide (wt)
93   float incremento2 = (2.0f * M_PI * frequencia) / num_pontos;
94   float incremento3 = (2.0f * M_PI * frequencia) / num_pontos;
95
96   const float limite_angulo = 2.0f * M_PI; //limite 2*pi para evitar
       estouro do ponto flutuante
97
98   angulo1 = fmod(angulo1 + incremento1, limite_angulo);
99   angulo2 = fmod(angulo2 + incremento2, limite_angulo);
100  angulo3 = fmod(angulo3 + incremento3, limite_angulo);
101
102  offset = 50 - amplitude;
103  amplitude = frequencia * fator_escala;
104
105  if(frequencia > 60) //amplitude, ou seja, a tensão não pode passar dos
       220V
106  {
107    amplitude = 50;
108  }
109
110  // calcular os sinais para o sentido de rotação normal
111  if(inversao_rotacao == 0)
112  {
113    pulso1 = (amplitude * (sinf(angulo1)+1)) + offset;
114    pulso2 = (amplitude * (sinf(angulo2)+1)) + offset;
115    pulso3 = (amplitude * (sinf(angulo3)+1)) + offset;
116  }
117  // calcular os sinais para o sentido de rotação inverso
118  if(inversao_rotacao == 1)
119  {
120    pulso1 = (amplitude * (sinf(angulo1)+1)) + offset;
121    pulso2 = (amplitude * (sinf(angulo3)+1)) + offset;
122    pulso3 = (amplitude * (sinf(angulo2)+1)) + offset;
123  }
124
125  __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, pulso1);
126  __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_2, pulso2);
127  __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_3, pulso3);
128
129 }
130 }
131
132 /* USER CODE END 0 */
```

```
133 /**
134   * @brief  The application entry point.
135   * @retval int
136   */
137 int main(void)
138 {
139
140   /* USER CODE BEGIN 1 */
141   /* USER CODE END 1 */
142
143   /* MCU
          Configuration--------------------------------------------------------*/
144
145   /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the
          Systick. */
146   HAL_Init();
147
148   /* USER CODE BEGIN Init */
149   /* USER CODE END Init */
150
151   /* Configure the system clock */
152   SystemClock_Config();
153
154   /* USER CODE BEGIN SysInit */
155   /* USER CODE END SysInit */
156
157   /* Initialize all configured peripherals */
158   MX_GPIO_Init();
159   MX_TIM1_Init();
160   MX_TIM2_Init();
161   MX_I2C1_Init();
162   MX_ADC1_Init();
163   /* USER CODE BEGIN 2 */
164
165   HAL_Delay(1000); //Atraso de 1s para iniciar os perifericos
166   HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim2);
167   HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
168   HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
169   HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
170   HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
171   HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3);
172   HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3);
173
174   /*****************************/
175
176   //Habilita e desabilita a proteção dos IGBTs no chip FSBB20CH60C
177   HAL_Delay(1000); //Aguarda 1s;
178   protecao = 0; //'1' Habilita Proteção e '0' IGBT's Acionados
179   HAL_Delay(100); //Aguarda 100ms Para Iniciar;
180
181   /* USER CODE END 2 */
182
183   /* Infinite loop */
```

```
184   /* USER CODE BEGIN WHILE */
185     SSD1306_Init();
186     SSD1306_Fill(0);
187     SSD1306_UpdateScreen();
188     SSD1306_GotoXY (10,10);
189     SSD1306_Puts ("Frequency:", &Font_11x18, 1);
190   while (1)
191   {
192     start = HAL_GetTick();  //ponto de início para cálculo do tempo de
          execução
193
194     /* USER CODE END WHILE */
195
196     /* USER CODE BEGIN 3 */
197
198 //Lógica Para Ativar os IGBTs
199       if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC, fault_Pin) == GPIO_PIN_RESET) // IGBT's
          Ativo;
200       {
201         HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, protection_Pin, GPIO_PIN_RESET);
202       }
203       else
204       {
205           HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, protection_Pin, GPIO_PIN_SET);
206       }
207
208   // Lógica para rampa no start do motor(um softstart)
209
210   void atualizarFrequencia(int frequencia) {
211       char buffer[10];  // Buffer para armazenar o valor convertido
212       sprintf(buffer, "%dHz", frequencia);  // Converte a frequ ncia para
          uma string
213       SSD1306_GotoXY (10,30);
214       SSD1306_Puts(buffer, &Font_11x18, 1);  // Exibe a string no display
215       SSD1306_UpdateScreen();  // Atualiza o display
216   }
217
218   /*************************************************************/
219   //Lógica para variar frequ ncia de acordo com tensão no
        barramento(similar ao potenci metro).
220   HAL_ADC_Start(&hadc1);
221   HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 100); //leitura analogica
222   adcpot = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
223   frequencia = 20 + adcpot * 0.009778; // (40Hz / 4095.Resolução)final com
        offset teremos 60Hz
224   HAL_ADC_Stop(&hadc1);
225   HAL_Delay(1);
226   atualizarFrequencia(frequencia);  // Atualiza o display com o novo valor
227
228   /*************************************************************/
229 //Partida suave**********************************
230   //if (frequencia != 60)
231  // {
```

```
232 //    for(int i=0; i<60; i++)
233 //  {
234 //    frequencia++;
235 //    atualizarFrequencia(frequencia);  // Atualiza o display com o novo
        valor
236 //    HAL_Delay(150);
237
238   //}
239   //}
240   end = HAL_GetTick(); //ponto final para cálculo do tempo de execução
241
242   // Calcula o tempo decorrido em milissegundos
243       elapsed_time_ms = end - start;
244
245   // Prepara a string para exibição
246       char time_buffer[30]; // Buffer para armazenar a string do tempo
247       sprintf(time_buffer, "Time: %lu ms", elapsed_time_ms);
248
249   // Exibe o tempo decorrido no display
250       SSD1306_GotoXY(10, 50);  // Ajuste a posição conforme necessário
251       SSD1306_Puts(time_buffer, &Font_7x10, 1);
252       SSD1306_UpdateScreen();  // Atualiza o display para exibir o valor
253   }
254
255   /* USER CODE END 3 */
256 }
257 /**
258   * @brief System Clock Configuration
259   * @retval None
260   */
261 void SystemClock_Config(void)
262 {
263   RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
264   RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
265
266   /** Configure the main internal regulator output voltage
267   */
268   HAL_PWREx_ControlVoltageScaling(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE1_BOOST);
269
270   /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
271   * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
272   */
273   RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
274   RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
275   RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
276   RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
277   RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = RCC_PLLM_DIV6;
278   RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 85;
279   RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV2;
280   RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = RCC_PLLQ_DIV2;
281   RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = RCC_PLLR_DIV2;
282   if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
283   {
```

```
284     Error_Handler();
285   }
286 
287   /** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
288   */
289   RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
290                                 |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
291   RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
292   RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
293   RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
294   RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
295 
296   if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_4) != HAL_OK)
297   {
298     Error_Handler();
299   }
300 }
301 
302 /**
303   * @brief ADC1 Initialization Function
304   * @param None
305   * @retval None
306   */
307 static void MX_ADC1_Init(void)
308 {
309 
310   /* USER CODE BEGIN ADC1_Init 0 */
311   /* USER CODE END ADC1_Init 0 */
312 
313   ADC_MultiModeTypeDef multimode = {0};
314   ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};
315 
316   /* USER CODE BEGIN ADC1_Init 1 */
317   /* USER CODE END ADC1_Init 1 */
318 
319   /** Common config
320   */
321   hadc1.Instance = ADC1;
322   hadc1.Init.ClockPrescaler = ADC_CLOCK_ASYNC_DIV4;
323   hadc1.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B;
324   hadc1.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
325   hadc1.Init.GainCompensation = 0;
326   hadc1.Init.ScanConvMode = ADC_SCAN_DISABLE;
327   hadc1.Init.EOCSelection = ADC_EOC_SINGLE_CONV;
328   hadc1.Init.LowPowerAutoWait = DISABLE;
329   hadc1.Init.ContinuousConvMode = DISABLE;
330   hadc1.Init.NbrOfConversion = 1;
331   hadc1.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
332   hadc1.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
333   hadc1.Init.ExternalTrigConvEdge = ADC_EXTERNALTRIGCONVEDGE_NONE;
334   hadc1.Init.DMAContinuousRequests = DISABLE;
335   hadc1.Init.Overrun = ADC_OVR_DATA_PRESERVED;
336   hadc1.Init.OversamplingMode = DISABLE;
```

```
337   if (HAL_ADC_Init(&hadc1) != HAL_OK)
338   {
339     Error_Handler();
340   }
341 
342   /** Configure the ADC multi-mode
343   */
344   multimode.Mode = ADC_MODE_INDEPENDENT;
345   if (HAL_ADCEx_MultiModeConfigChannel(&hadc1, &multimode) != HAL_OK)
346   {
347     Error_Handler();
348   }
349 
350   /** Configure Regular Channel
351   */
352   sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;
353   sConfig.Rank = ADC_REGULAR_RANK_1;
354   sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_2CYCLES_5;
355   sConfig.SingleDiff = ADC_SINGLE_ENDED;
356   sConfig.OffsetNumber = ADC_OFFSET_NONE;
357   sConfig.Offset = 0;
358   if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)
359   {
360     Error_Handler();
361   }
362   /* USER CODE BEGIN ADC1_Init 2 */
363   /* USER CODE END ADC1_Init 2 */
364 
365 }
366 /**
367   * @brief I2C1 Initialization Function
368   * @param None
369   * @retval None
370   */
371 static void MX_I2C1_Init(void)
372 {
373 
374   /* USER CODE BEGIN I2C1_Init 0 */
375   /* USER CODE END I2C1_Init 0 */
376 
377   /* USER CODE BEGIN I2C1_Init 1 */
378   /* USER CODE END I2C1_Init 1 */
379   hi2c1.Instance = I2C1;
380   hi2c1.Init.Timing = 0x40621236;
381   hi2c1.Init.OwnAddress1 = 0;
382   hi2c1.Init.AddressingMode = I2C_ADDRESSINGMODE_7BIT;
383   hi2c1.Init.DualAddressMode = I2C_DUALADDRESS_DISABLE;
384   hi2c1.Init.OwnAddress2 = 0;
385   hi2c1.Init.OwnAddress2Masks = I2C_OA2_NOMASK;
386   hi2c1.Init.GeneralCallMode = I2C_GENERALCALL_DISABLE;
387   hi2c1.Init.NoStretchMode = I2C_NOSTRETCH_DISABLE;
388   if (HAL_I2C_Init(&hi2c1) != HAL_OK)
389   {
```

```
390     Error_Handler();
391   }
392
393   /** Configure Analogue filter
394   */
395   if (HAL_I2CEx_ConfigAnalogFilter(&hi2c1, I2C_ANALOGFILTER_ENABLE) !=
          HAL_OK)
396   {
397     Error_Handler();
398   }
399
400   /** Configure Digital filter
401   */
402   if (HAL_I2CEx_ConfigDigitalFilter(&hi2c1, 0) != HAL_OK)
403   {
404     Error_Handler();
405   }
406   /* USER CODE BEGIN I2C1_Init 2 */
407   /* USER CODE END I2C1_Init 2 */
408
409 }
410 /**
411   * @brief TIM1 Initialization Function
412   * @param None
413   * @retval None
414   */
415 static void MX_TIM1_Init(void)
416 {
417
418   /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 0 */
419   /* USER CODE END TIM1_Init 0 */
420
421   TIM_ClockConfigTypeDef sClockSourceConfig = {0};
422   TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
423   TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = {0};
424   TIM_BreakDeadTimeConfigTypeDef sBreakDeadTimeConfig = {0};
425
426   /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 1 */
427
428   /* USER CODE END TIM1_Init 1 */
429   htim1.Instance = TIM1;
430   htim1.Init.Prescaler = 170-1;
431   htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
432   htim1.Init.Period = 99;
433   htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
434   htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
435   htim1.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
436   if (HAL_TIM_Base_Init(&htim1) != HAL_OK)
437   {
438     Error_Handler();
439   }
440   sClockSourceConfig.ClockSource = TIM_CLOCKSOURCE_INTERNAL;
441   if (HAL_TIM_ConfigClockSource(&htim1, &sClockSourceConfig) != HAL_OK)
```

```
442   {
443     Error_Handler();
444   }
445   if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim1) != HAL_OK)
446   {
447     Error_Handler();
448   }
449   sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
450   sMasterConfig.MasterOutputTrigger2 = TIM_TRGO2_RESET;
451   sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
452   if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim1, &sMasterConfig) !=
        HAL_OK)
453   {
454     Error_Handler();
455   }
456   sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
457   sConfigOC.Pulse = 50;
458   sConfigOC.OCPolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
459   sConfigOC.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_HIGH;
460   sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
461   sConfigOC.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_RESET;
462   sConfigOC.OCNIdleState = TIM_OCNIDLESTATE_RESET;
463   if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_1) !=
        HAL_OK)
464   {
465     Error_Handler();
466   }
467   if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_2) !=
        HAL_OK)
468   {
469     Error_Handler();
470   }
471   if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_3) !=
        HAL_OK)
472   {
473     Error_Handler();
474   }
475   sBreakDeadTimeConfig.OffStateRunMode = TIM_OSSR_DISABLE;
476   sBreakDeadTimeConfig.OffStateIDLEMode = TIM_OSSI_DISABLE;
477   sBreakDeadTimeConfig.LockLevel = TIM_LOCKLEVEL_OFF;
478   sBreakDeadTimeConfig.DeadTime = 149;
479   sBreakDeadTimeConfig.BreakState = TIM_BREAK_DISABLE;
480   sBreakDeadTimeConfig.BreakPolarity = TIM_BREAKPOLARITY_HIGH;
481   sBreakDeadTimeConfig.BreakFilter = 0;
482   sBreakDeadTimeConfig.BreakAFMode = TIM_BREAK_AFMODE_INPUT;
483   sBreakDeadTimeConfig.Break2State = TIM_BREAK2_DISABLE;
484   sBreakDeadTimeConfig.Break2Polarity = TIM_BREAK2POLARITY_HIGH;
485   sBreakDeadTimeConfig.Break2Filter = 0;
486   sBreakDeadTimeConfig.Break2AFMode = TIM_BREAK_AFMODE_INPUT;
487   sBreakDeadTimeConfig.AutomaticOutput = TIM_AUTOMATICOUTPUT_DISABLE;
488   if (HAL_TIMEx_ConfigBreakDeadTime(&htim1, &sBreakDeadTimeConfig) !=
        HAL_OK)
489   {
```

```
490     Error_Handler();
491   }
492   /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 2 */
493   /* USER CODE END TIM1_Init 2 */
494   HAL_TIM_MspPostInit(&htim1);
495 }
496 /**
497   * @brief TIM2 Initialization Function
498   * @param None
499   * @retval None
500   */
501 static void MX_TIM2_Init(void)
502 {
503
504   /* USER CODE BEGIN TIM2_Init 0 */
505
506   /* USER CODE END TIM2_Init 0 */
507
508   TIM_ClockConfigTypeDef sClockSourceConfig = {0};
509   TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
510
511   /* USER CODE BEGIN TIM2_Init 1 */
512   /* USER CODE END TIM2_Init 1 */
513   htim2.Instance = TIM2;
514   htim2.Init.Prescaler = 170-1;
515   htim2.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
516   htim2.Init.Period = 99;
517   htim2.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
518   htim2.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
519   if (HAL_TIM_Base_Init(&htim2) != HAL_OK)
520   {
521     Error_Handler();
522   }
523   sClockSourceConfig.ClockSource = TIM_CLOCKSOURCE_INTERNAL;
524   if (HAL_TIM_ConfigClockSource(&htim2, &sClockSourceConfig) != HAL_OK)
525   {
526     Error_Handler();
527   }
528   sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
529   sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
530   if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim2, &sMasterConfig) !=
        HAL_OK)
531   {
532     Error_Handler();
533   }
534   /* USER CODE BEGIN TIM2_Init 2 */
535   /* USER CODE END TIM2_Init 2 */
536 }
537 /**
538   * @brief GPIO Initialization Function
539   * @param None
540   * @retval None
541   */
```

```
542 static void MX_GPIO_Init(void)
543 {
544   GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
545 /* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_1 */
546 /* USER CODE END MX_GPIO_Init_1 */
547
548   /* GPIO Ports Clock Enable */
549   __HAL_RCC_GPIOF_CLK_ENABLE();
550   __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
551   __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
552   __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
553
554   /*Configure GPIO pin Output Level */
555   HAL_GPIO_WritePin(protection_GPIO_Port, protection_Pin, GPIO_PIN_RESET);
556
557   /*Configure GPIO pin : fault_Pin */
558   GPIO_InitStruct.Pin = fault_Pin;
559   GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
560   GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
561   HAL_GPIO_Init(fault_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);
562
563   /*Configure GPIO pin : protection_Pin */
564   GPIO_InitStruct.Pin = protection_Pin;
565   GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
566   GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
567   GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
568   HAL_GPIO_Init(protection_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);
569
570 /* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_2 */
571 /* USER CODE END MX_GPIO_Init_2 */
572 }
573 /* USER CODE BEGIN 4 */
574 /* USER CODE END 4 */
575 /**
576   * @brief  This function is executed in case of error occurrence.
577   * @retval None
578   */
579 void Error_Handler(void)
580 {
581   /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
582   /* User can add his own implementation to report the HAL error return
        state */
583   __disable_irq();
584   while (1)
585   {
586   }
587   /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
588 }
589
590 #ifdef  USE_FULL_ASSERT
591 /**
592   * @brief  Reports the name of the source file and the source line number
593   *         where the assert_param error has occurred.
```

```
594   * @param  file: pointer to the source file name
595   * @param  line: assert_param error line source number
596   * @retval None
597   */
598 void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
599 {
600   /* USER CODE BEGIN 6 */
601   /* User can add his own implementation to report the file name and line
          number,
602      ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file,
             line) */
603   /* USER CODE END 6 */
604 }
605 #endif /* USE_FULL_ASSERT */
```

Anexos

Anexo A – Características Técnicas NUCLEO-STM32G491RE

Características Técnicas

- **Núcleo:** CPU ARM® Cortex®-M4 de 32 bits com FPU, acelerador adaptativo em tempo real (ART Accelerator™) permitindo execução de estado de espera zero a partir da memória Flash, frequência de até 84 MHz, unidade de proteção de memória, 105 DMIPS/1,25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1) e instruções DS.
- **Memórias:** até 512 Kbytes de memória Flash e até 96 Kbytes de SRAM.
- **Gestão de relógio, reset e fornecimento:** Alimentação de aplicação de 1,7 V a 3,6 V e E/S, oscilador de cristal de 4 a 26 MHz, RC interno de 16 MHz ajustado de fábrica, oscilador de 32 kHz para RTC com calibração, RC interno de 32 kHz com calibração.
- **Consumo de energia:**
  - Execução: 146 µA/MHz (periférico desligado).
  - Parar (Flash no modo parar, tempo de despertar rápido): 42 µA típico a 25 °C; 65 µA máx. a 25 °C.
  - Parar (Flash no modo de desligamento profundo, tempo de despertar rápido): até 10 µA a 25 °C; 30 µA máx. a 25 °C.
  - Espera: 2,4 µA @ 25 °C / 1,7 V sem RTC; 12 µA @ 85 °C @ 1,7 V.
  - Alimentação VBAT para RTC: 1 µA @ 25 °C.
- **Conversor A/D:** 1×12 bits, 2,4 MSPS: até 16 canais.
- **DMA de uso geral:** controladores DMA de 16 fluxos com FIFOs e suporte a burst.
- **Temporizadores:** até 11 temporizadores, incluindo:
  - até seis temporizadores de 16 bits.
  - dois temporizadores de 32 bits de até 84 MHz, cada um com até quatro entradas de codificador IC/OC/PWM ou contador de pulsos e quadratura (incremental).
  - dois temporizadores watchdog (independentes e de janela) e um temporizador SysTick.
- **Modo de depuração:** Interfaces de depuração de fio serial (SWD) e JTAG; Cortex®-M4 Macrocell™ de rastreamento incorporado.
- **Portas de E/S:** até 81 portas com capacidade de interrupção, incluindo:
  - até 78 E/S rápidas de até 42 MHz.
  - todas as portas de E/S são tolerantes a 5 V.
- **Interfaces de comunicação:** até 12 interfaces, incluindo:
  - até 3 interfaces I2C (SMBus/PMBus).

  - até 3 USARTs (2 x 0,5 Mbit/s, 1 x 5,25 Mbit/s), interface ISO 7816, LIN, IrDA, controle de modem.
  - até 4 SPIs (até 42 Mbit/s em fCPU = 84 MHz), SPI2 e SPI3 com I2S full-duplex multiplexado para atingir precisão de classe de áudio via PLL de áudio interno ou clock externo.
  - interface SDIO – Conectividade avançada: dispositivo/host/controlador OTG USB 2.0 de velocidade total com PHY no chip.
- **Unidade de cálculo CRC.**
- **ID exclusivo:** 96 bits.
- **RTC:** precisão de subsegundos, calendário de hardware.
- Todos os pacotes (WLCSP49, LQFP64/100, UFQFPN48, UFBGA100) são ECOPACK®2.

Aplicações

Os dispositivos STM32G491RE são adequados para uma ampla gama de aplicações, incluindo:

- Controle de acionamento e aplicação do motor.
- Equipamentos médicos.
- Aplicações industriais: PLC, inversores, disjuntores.
- Impressoras e scanners.
- Sistemas de alarme, vídeo porteiro e HVAC.
- Eletrodomésticos de áudio.
- Hub de sensor de telefone móvel.


UnB