



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAMON DA CONCEIÇÃO ALENCAR

SISTEMA ININTERRUPTO DE CONTROLE DE GERAÇÃO, ARMAZENAMENTO E CARGA

Balsas

2022

RAMON DA CONCEIÇÃO ALENCAR

**SISTEMA ININTERRUPTO DE CONTROLE DE
GERAÇÃO, ARMAZENAMENTO E CARGA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Maranhão (UFMA),
como pré-requisito para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Wenllson Carlos Ferreira Leite

Balsas

2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

da Conceição Alencar, Ramon.

SISTEMA ININTERRUPTO DE CONTROLE DE GERAÇÃO,
ARMAZENAMENTO E CARGA / Ramon da Conceição Alencar. -
2022.

60 f.

Orientador(a): Wenllson Carlos Ferreira Leite.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, Balsas-MA, 2022.

1. Controle. 2. Ininterrupto. 3. Sistema. I. Carlos
Ferreira Leite, Wenllson. II. Título.

RAMON DA CONCEIÇÃO ALENCAR

SISTEMA ININTERRUPTO DE CONTROLE DE GERAÇÃO, ARMAZENAMENTO E CARGA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Maranhão (UFMA),
como pré-requisito para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

TCC. Balsas, 22 de Dezembro de 2022:

**Prof. Me. Wenllson Carlos Ferreira
Leite**
Orientador
Universidade Federal do Maranhão

**Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz
Costa Filho**
Examinador Interno
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto
Examinador Interno
Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho à minha imprescindível família
(pai, mãe e irmã).*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me conceder a oportunidade de viver para desfrutar dos resultados deste trabalho.

À minha família, José de Ribamar Barros de Alencar (pai), Cicera Vieira da Conceição (mãe) e Raquel da Conceição Alencar (irmã), que foi fundamental para minha permanência em foco (destaque para uma ideia da minha irmã, Raquel, cuja colaboração atuou como propulsor para o avanço deste trabalho) e foram meu braço forte em todos os momentos.

Ao meu orientador de TCIC do curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Dr. Madson Rubem Oliveira Silva, que me apresentou o sistema *LaTeX* para preparação de documentos.

Ao meu orientador deste trabalho, Me. Wenllson Carlos Ferreira Leite, que investiu tempo e dedicação para a conclusão do mesmo.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma, com ideias e esclarecimento de dúvidas, por exemplo.

"Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração."

(Nikola Tesla)

Resumo

Sistemas de controle são de extrema importância para o setor industrial, principalmente para o desenvolvimento de novas tecnologias. Devemos obter novas técnicas para o desenvolvimento da autonomia energética. O presente trabalho pretende demonstrar meios de controlar sistemas eletrônicos ininterruptos de controle via chaveamento e monitoramento de potência dos circuitos. Portanto, apresenta-se soluções adequadas e eficientes para o monitoramento e controle do consumo de cargas e geração. O sistema também pode ser melhorado com novas programações inseridas durante o desenvolvimento de controle de geração, armazenamento e fornecimento de carga.

Palavras-chave: Controle; Ininterrupto; Sistema.

Abstract

Control systems are extremely important for the industrial sector, mainly for the development of new technologies. We must obtain new techniques for the development of energy autonomy. The present work intends to demonstrate means of controlling uninterrupted electronic control systems via switching and monitoring of circuit power. Therefore, adequate and efficient solutions are presented for monitoring and controlling the consumption of loads and generation. The system can also be improved with new programming inserted during the development of generation control, storage and load supply.

Keywords: Control; Uninterrupted; System.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Visão geral de um sistema de energias renováveis. Imagem de (RASHID, 1999).	13
Figura 2 – Estatísticas de geração da matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021. Imagem de (ENERGÉTICA, 2022).	15
Figura 3 – Usina Hidrelétrica de Itaipu. Imagem de domínio público.	16
Figura 4 – Aerogeradores de eixo horizontal. Imagem de domínio público.	19
Figura 5 – Sistema Eólico com Turbina de eixo horizontal do tipo <i>upwind</i> e <i>downwind</i> . Imagem de domínio público.	20
Figura 6 – Na figura (a) temos um sistema eólico com Turbina <i>Darrieus</i> e na figura (b) um sistema eólico com Turbina <i>Savonius</i>	20
Figura 7 – Esquema de módulo bifacial em atividade. Imagem de domínio público.	24
Figura 8 – Esquema de Bateria de Íon-Lítio. Imagem retirada de (ROMÃO; CARVALHO; JUNIOR, 2020).	27
Figura 9 – Conversor CC-CC. Imagem retirada de (RASHID, 1999).	29
Figura 10 – Conversor CC-CA. Imagem retirada de (RASHID, 1999).	30
Figura 11 – Inversor monofásico em ponte completa. Imagem retirada de (RASHID, 1999).	31
Figura 12 – Resistor de $1k\Omega$. Imagem de domínio público.	32
Figura 13 – Capacitor eletrolítico de $1000\mu F$ e $50V$. Imagem de domínio público.	33
Figura 14 – Indutor micro choque. Imagem de domínio público.	33
Figura 15 – Diodo de silício. Imagem de domínio público.	34
Figura 16 – Transistor <i>BC546</i> . Imagem de domínio público.	34
Figura 17 – Varistor de $270V$. Imagem de domínio público.	35
Figura 18 – Fusível de $4A$. Imagem executada pelo autor.	35
Figura 19 – Transformador monofásico $12V-220V$. Imagem de domínio público.	36
Figura 20 – Placa Arduino Uno. Imagem de domínio público.	36
Figura 21 – Módulo Relé de 4 canais. Imagem de domínio público.	37
Figura 22 – Sensor de tensão CC. Imagem de domínio público.	37
Figura 23 – Motor CC de $250W$. Imagem executada pelo autor.	38
Figura 24 – Gerador CC de $120W$. Imagem executada pelo autor.	38
Figura 25 – Bateria de íon-Lítio de aproximadamente $12V$. Imagem executada pelo autor.	39
Figura 26 – Motor-gerador. Imagem executada pelo autor.	40
Figura 27 – Regulador LM7812. Imagem executada pelo autor.	41
Figura 28 – Regulador LM7812 na protoboard. Imagem executada pelo autor.	41
Figura 29 – Comparador de Sinais. Imagem executada pelo autor.	42

Figura 30 – Inversor. Imagem executada pelo autor.	43
Figura 31 – Inversor Monofásico 12V-220V. Imagem executada pelo autor.	43
Figura 32 – Controle do Sistema.	44
Figura 33 – Fluxograma do Sistema.	45
Figura 34 – Sistema de controle ininterrupto alimentado a partir do motor-gerador. Imagem reproduzida pelo autor.	46
Figura 35 – Tensão no gerador. Imagem reproduzida pelo autor.	47
Figura 36 – Tensão na carga alimentada a partir do motor-gerador. Imagem reproduzida pelo autor.	47
Figura 37 – Sistema de controle ininterrupto alimentado a partir de uma bateria. Imagem reproduzida pelo autor.	48
Figura 38 – Tensão na carga alimentada a partir da bateria. Imagem reproduzida pelo autor.	48
Figura 39 – Carga acionada. Imagem reproduzida pelo autor.	49
Figura 40 – Entrada triangular e senoidal do comparador de sinais. Imagem reproduzida pelo autor.	49
Figura 41 – Projeto do sistema completo do circuito na planta. Executado pelo autor, no EasyEAD.	50
Figura 42 – Fluxograma do código. Executado pelo autor.	51
Figura 43 – Esquema regulador de tensão. Projeto executado pelo autor, no EasyEAD.	53
Figura 44 – Esquema Comparador de Sinais. Projeto executado pelo autor, no EasyEAD.	54
Figura 45 – Esquema inversor monofásico. Projeto executado pelo autor, no EasyEAD.	55

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
2	PRINCIPAIS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.1	Sistema Hidrelétrico	15
2.1.1	Principais componentes de uma hidrelétrica	16
2.1.2	Cálculo da energia gerada por uma hidrelétrica	17
2.2	Sistema Eólico	18
2.2.1	Principais componentes de um sistema eólico	20
2.2.2	Cálculo da eficiência de uma turbina eólica	21
2.3	Sistema Fotovoltaico	23
2.3.1	Principais componentes de um sistema fotovoltaico	24
3	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO, CONTROLE E CONVERSÃO DE ENERGIA	26
3.1	Sistemas de Armazenamento	26
3.2	Sistemas de Controle	27
3.3	Sistemas Conversores de Energia	28
3.3.1	Conversores CC-CC	28
3.3.2	Conversores CC-CA	29
3.3.3	Inversores Monofásicos em Ponte	30
4	COMPONENTES ELETRÔNICOS DO PROJETO	32
4.1	Resistor	32
4.2	Capacitor	32
4.3	Indutor	33
4.4	Diodo de silício	33
4.5	Transistor	34
4.6	Varistor	35
4.7	Fusível	35
4.8	Transformador monofásico 12V-220V	35
4.9	Placa Arduino Uno	36
4.10	Módulo Relé de 4 canais	37

4.11	Sensor de tensão CC	37
4.12	Motor CC de 250W	38
4.13	Gerador CC de 120W	38
4.14	Bateria de íon-Lítio	39
5	PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE GERAÇÃO, ARMAZENAMENTO E CARGA	40
5.1	Conjunto Motor-Gerador CC do sistema	40
5.2	Regulagem da Tensão CC	41
5.3	Comparador de Sinais	42
5.4	Inversor Monofásico 12V-220V	42
5.5	Controle do sistema	44
5.6	Fluxograma do Sistema	44
6	RESULTADOS	46
6.1	Execução do Projeto	46
6.2	Planta do sistema	50
6.3	Fluxograma para código fonte do sistema	50
7	CONCLUSÃO	52
7.1	Trabalhos futuros	52
A	DIAGRAMA REGULADOR DE TENSÃO	53
B	DIAGRAMA COMPARADOR DE SINAIS	54
C	DIAGRAMA INVERSOR MONOFÁSICO	55
D	CÓDIGO PROPOSTO PARA O SISTEMA	56
	REFERÊNCIAS	59

1 Introdução

A geração de energia elétrica é imprescindível para a mecânica da produtividade e sobrevivência no mundo. A complexa sociedade originada pela evolução da tecnologia, é totalmente dependente de aparelhos eletroeletrônicos, comércio, indústrias e derivados, que são abastecidos por redes de sistemas de energia elétrica. E para suprir demandas a nível mundial e até mesmo regional, são necessárias fontes de energia atreladas a sistemas que forneçam qualidade de uso e durabilidade, visando melhor atendimento ao consumidor final e contribuições para o meio ambiente.

Uma solução considerada, aplicada ao longo de várias décadas que se passaram até a atualidade, é o uso de fontes naturais que somatizam inúmeras vantagens, recorrendo a recursos inesgotáveis como combustível para acionamento mecânico de geradores (geração hidrelétrica, geração por fontes eólicas e biomassa, por exemplo), excitação de células fotovoltaicas via irradiação solar, dentre outras.

A Figura 1 representa um simples esquema de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia. Podemos notar que a fonte é associada a um gerador, que por sua vez, permite a conversão de energia mecânica em energia elétrica, onde jusante ao gerador, conversores eletrônicos de potência são acoplados ao sistema para que as condições finais da carga sejam admitidas.

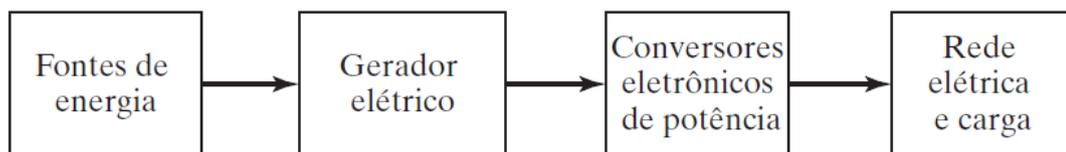


Figura 1 – Visão geral de um sistema de energias renováveis. Imagem de (RASHID, 1999).

Estabelecimentos das mais variadas áreas de produtividade e hospitais, por exemplo, dependem de satisfatória qualidade de energia, bem como precisam se precaver de possíveis contingências na rede. Visto isso, uma das soluções mais consideráveis para estes casos, é o implante de banco de baterias recarregáveis no sistema.

A má qualidade de energia em momentos de alta demanda de atividades para um sistema em operação pode causar prejuízos exorbitantes durante a atividade em curso e levar equipamentos à falência instantânea. Flutuações de tensão tornam-se nocivas à medida que ultrapassam os limites de alimentação de entrada de equipamentos em uso. E uma subtensão pode gerar danos à durabilidade da máquina, reduzindo sua vida útil.

Geralmente as baterias encontram-se em nobreaks, equipamentos requisitados para regulação e armazenamento de energia, que possibilitam um uso seguro da energia elétrica.

Em casos de variações no fornecimento de energia, os nobreaks agem como reguladores de tensão, ponderando o nível de tensão de entrada, permitindo a estabilização do sinal (WU et al., 2013).

1.1 Justificativa

Em hospitais, concessionárias de energia, fábricas e indústrias, por exemplo, o controle de carga adaptado a sistemas de armazenamento é uma das principais formas de prevenção contra falhas no fornecimento de energia (LEUCHTER et al., 2007).

Vidas humanas podem correr perigo se, na dependência de um equipamento eletrônico médico, a potência mínima da máquina não for suprimida. Semelhantemente, uma concessionária de energia precisa conceder a distribuição com o maior nível de eficiência possível, onde, mesmo havendo contigência na rede, o produto final de energia distribuída deve-se manter favorável ao uso do cliente.

Há uma vasta lista de problemáticas cuja as soluções dependem do controle de carga em conjunto com sistemas de armazenamento. Portanto, temos que a pauta deste trabalho é de grande relevância, como sistema de controle, para o setor industrial, concessionárias de energia, hospitais e derivados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema ininterrupto de controle de geração, armazenamento e carga, com alimentação de cargas CA a partir de fonte de tensão CC, e estabelecer fornecimento *off-grid* em casos de contigências.

1.2.2 Objetivos específicos

Seguindo direcionamento do objetivo geral, temos a pretensão de:

- Levantar dados do projeto.
- Demonstrar aspectos de controle.
- Desenvolver uma planta de controle para o sistema.
- Desenvolver códigos na IDE do Arduino Uno para controle de segurança do sistema.

2 Principais Sistemas de Geração de Energia Elétrica

Segundo dados fornecidos pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), através do Relatório de Síntese 2022, ano base 2021, do Balanço Energético Nacional (BEN), as principais fontes renováveis no Brasil são hidráulica, eólica, biomassa e solar.

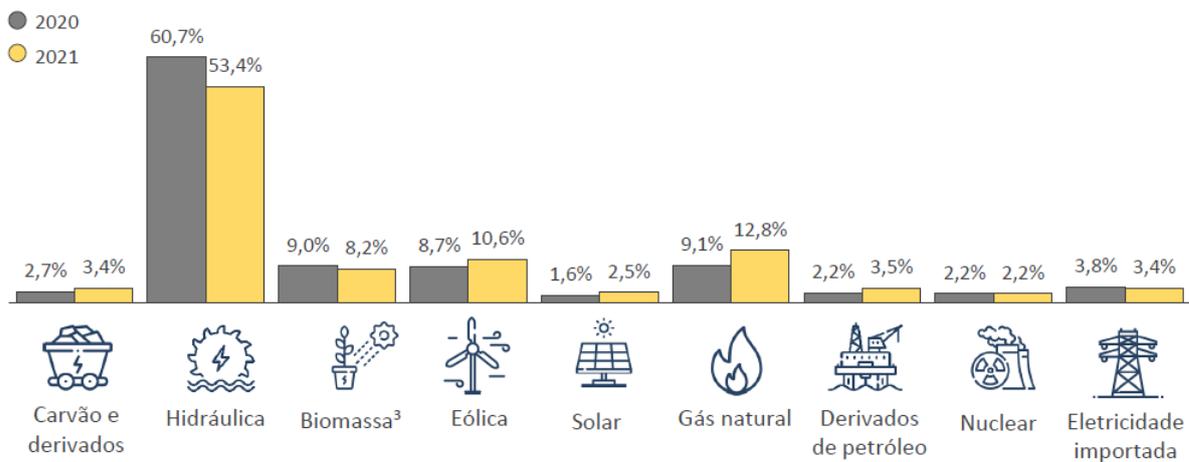


Figura 2 – Estatísticas de geração da matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021. Imagem de (ENERGÉTICA, 2022).

2.1 Sistema Hidrelétrico

A fonte primária de um sistema hidrelétrico, como o próprio nome sugere, é a água. O sistema é composto de estruturas arquitetônicas que possibilitam a absorção da energia potencial hidráulica, a partir da queda d'água estabelecida pela implantação de barragens em rios. Estas barragens acumulam água a um nível superior ao natural, formando reservatórios (TESSAROLO et al., 2014).

Como vemos no gráfico da Figura 2, a geração a partir de fontes hídricas ocupa o topo das estatísticas relacionadas à matriz energética brasileira, consolidando uma fonte renovável como principal combustível para geração de energia elétrica.

A hidrelétrica de Itaipu, vista na Figura 3, é referência mundial por sua produtividade por tempo de atuação. Em 2020, atingiu a marca de maior geradora de energia limpa renovável do planeta, produzindo em torno de 76.382 *GWh*, dos seus mais de 2,7 milhões de *GWh* já produzidos desde o início de sua operação (BINACIONAL, 2022).

No Brasil, as hidrelétricas têm distintas capacidades de geração. Assim, são classificadas de acordo com o produto da potência pelo tempo de operação, energia,



Figura 3 – Usina Hidrelétrica de Itaipu. Imagem de domínio público.

e com a área de instalação que implica o reservatório. Os tipos de hidrelétricas geradoras que existem são as Usinas Hidrelétricas (UHE), as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as CGHs produzem até 5 *MW* de potência, sendo o tipo de hidrelétrica que menos gera potência por CGH por hora. Em seguida, por ordem crescente de capacidade de geração, estão as PCHs, que geram entre 5 *MW* e 30 *MW* por PCH por hora. Por último, as UHEs têm previsão de geração superior a 30 *MW* por UHE por hora (destaque para a Usina de Itaipu, já mencionada anteriormente).

2.1.1 Principais componentes de uma hidrelétrica

As hidrelétricas possuem diversos componentes que direcionam a vazão do rio à turbina de aproveitamento do potencial hidráulico, componentes que permitem o fluxo natural do rio pós aproveitamento da água, sem perdas na vazão, componentes que realocam os peixes a montante da hidrelétrica, entre outros.

Os principais componentes são:

1. **Reservatório:** é formado a partir da instalação da barragem no rio, ampliando área para o volume de água, tornando o nível do rio, a montante, maior que o natural.
2. **Barragem:** estrutura de concreto também conhecida como represa. É utilizada para elevar o nível da água e garantir que a reservatório adquira volume útil suficiente para abastecer a carga final.
3. **Comporta:** permite a vazão da água no conduto para uso e fluxo contínuo do rio.

4. **Conduto forçado:** tubulação por onde a água flui após passar pelas comportas.
5. **Chaminé de equilíbrio:** serve para minimizar a pressão que pode ser originada no conduto forçado. Com o aumento da pressão, a água excedente sobe pela chaminé de equilíbrio e previne possíveis danos às tubulações.
6. **Gerador:** máquina síncrona reponsável por converter a energia mecânica hidráulica em energia elétrica.
7. **Turbina:** componente intermediário acoplado ao gerador, que sofre conjugado da energia cinética da água e transfere-o ao eixo de rotação do gerador.
8. **Tubo de sucção:** responsável pela canalização da água ao rio, após uso da mesma para geração.
9. **Vertedouro:** utilizado para eliminar o excesso de vazão turbinada, condição em que o nível de água ultrapassa o volume útil do reservatório, permitindo o fluxo natural do rio.

2.1.2 Cálculo da energia gerada por uma hidrelétrica

Para o cálculo da energia gerada de uma hidrelétrica tipo reservatório, consideremos a energia potencial do fluxo da água no conduto forçado, demonstrado a seguir

$$E_p = m_a g H, \quad (2.1)$$

onde m_a é a massa da água, g é a aceleração gravitacional e H é a altura da água no reservatório, em relação a turbina.

O fluxo da água pode ser obtido através da relação entre a massa da mesma e o tempo de fluxo em um determinado ponto, neste caso, a turbina. Portanto,

$$f = \frac{m_a}{t}, \quad (2.2)$$

onde

$$m_a = ft. \quad (2.3)$$

Substituindo a eq.(2.3) na eq.(2.1), teremos

$$E_p = fgHt. \quad (2.4)$$

Ao sair do conduto forçado em direção à turbina, a energia potencial da água, E_p , converte-se em energia cinética, E_c , destacando a velocidade com que a turbina é rotacionada pela água. Assim, consideremos a seguinte equação

$$E_c = \frac{1}{2} m_a v_a^2, \quad (2.5)$$

onde v é a velocidade com que a água gera um conjugado na turbina.

Sabemos que a densidade pode ser medida através da relação entre a massa de um objeto e o volume que este ocupa. No caso a água, teremos que

$$\rho = \frac{m_a}{V} \quad (2.6)$$

em que V é o volume da água que passa pela turbina.

Isolando m_a da eq.(2.6),

$$m_a = \rho V. \quad (2.7)$$

Como temos alguns parâmetros relevantes para o cálculo da energia cinética, e levando em consideração a área de seção transversal do conduto forçado, podemos descrever o volume como o produto entre a área do conduto, A_s , e o comprimento do mesmo (expressado pelo produto da velocidade da água, v_a , e o tempo, t , que a mesma leva para fluir por todo o conduto). Assim, a eq.(2.7) torna-se-á

$$m_a = \rho A_c v_a t, \quad (2.8)$$

onde, substituindo na eq.(2.5), teremos

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A_c t v_a^3. \quad (2.9)$$

Genericamente, a eficiência de energia é calculada através da relação entre energia de saída e energia de entrada,

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}}. \quad (2.10)$$

Para o cálculo da energia gerada em uma hidrelétrica, é necessário considerar perdas que são determinadas a partir da eficiência das pás e turbinas (η_p e η_t , respectivamente), eficiência do conduto forçado, η_c , (obtido a partir da eq.(2.1) e eq.(2.9)) e a eficiência do gerador, η_g . As referidas eficiências são obtidas através da relação entre a energia de saída em cada componente citado e sua energia de entrada, como destacado na eq.(2.10).

Por fim, considerando as perdas existentes durante o processo de geração a partir de uma hidrelétrica, podemos substituir a influência das eficiências apresentadas, na eq.(2.4). Logo,

$$E_g = f g H t (\eta_p \eta_t \eta_c \eta_g), \quad (2.11)$$

onde E_g é a energia gerada.

2.2 Sistema Eólico

O sistema eólico como em (ZHOU; HUANG; HONG, 2016) consiste em um agrupamento de dispositivos interconectados que permitem a extração da energia impulsionada

por correntes de vento, para a geração de energia elétrica. Como mostrado na Figura 2, o percentual de geração eólica nacional obteve um aumento na transição do ano de 2020 para o ano de 2021, segundo os dados da EPE, saindo de terceira maior fonte de geração de energia elétrica, para segunda.

Podemos classificar o sistema eólico segundo os tipos de turbinas, que são turbinas de eixo horizontal e turbinas de eixo vertical. As turbinas de eixo horizontal são mais usuais dentre os projetos de usinas eólicas, pois apresentam maior eficiência, visto que a área de cobertura das pás que entram em contato com o vento está sujeita majoritariamente à força de sustentação como mostrado em (BROOK; MORTON, 1988).



Figura 4 – Aerogeradores de eixo horizontal. Imagem de domínio público.

Na Figura 5 observamos uma representação de turbinas de eixo vertical *upwind* e *downwind*. As turbinas *upwind* recebem o impacto do vento frontalmente, necessitando de controle estabelecido por sensores de vento para direcionar o rotor do sistema à posição de maior fluxo por área. Já as *downwind*, recebem jatos de vento por trás das pás e o rotor não precisa de sistemas de orientação de vento.

Turbinas *Darrieus*, de eixo vertical, também produzem energia mecânica a partir da energia cinética do vento. Porém, sua configuração vertical não permite um melhor aproveitamento da força de sustentação, o que a torna uma turbina de baixa eficiência. Outra turbina de eixo vertical, conhecida como *Savonius*, usufrui de uma força de arrasto, que é formada pela energia resultante de ventos turbulentos e de baixa intensidade .

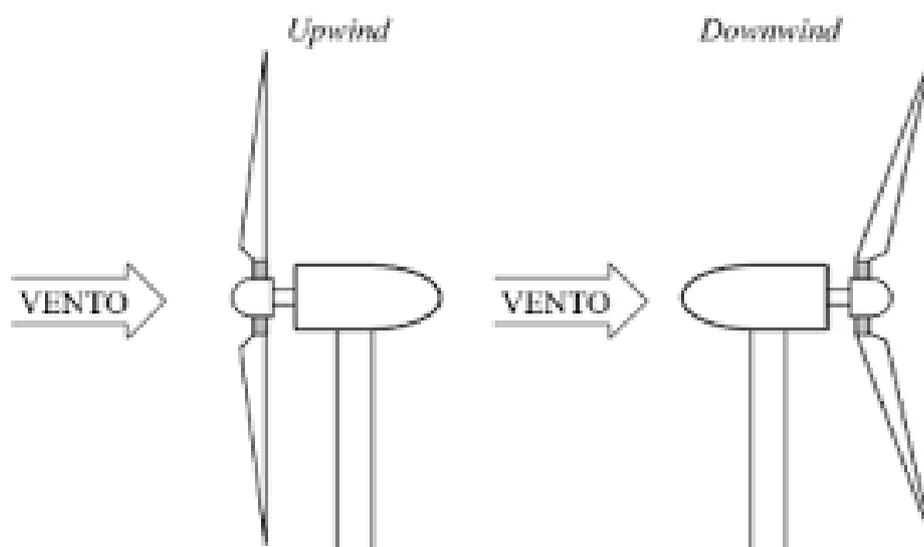


Figura 5 – Sistema Eólico com Turbina de eixo horizontal do tipo *upwind* e *downwind*. Imagem de domínio público.



(a) *Darrieus*. Imagem de domínio público.



(b) *Savonius*. Imagem de domínio público.

Figura 6 – Na figura (a) temos um sistema eólico com Turbina *Darrieus* e na figura (b) um sistema eólico com Turbina *Savonius*

2.2.1 Principais componentes de um sistema eólico

Nesta subseção, iremos fazer uma abordagem dos principais componentes de um sistema eólico de turbina horizontal, visto que são os aerogeradores eólicos de maior

eficiência e portanto, os principais no mercado como mostrado em (QANBARI; TOUSI, 2021).

1. **Pás eólicas:** são lâminas que captam a força gerada pelo vento e a transmitem para o rotor. Elas também definem o tipo de sistema eólico, podendo encontrar-se no eixo vertical ou horizontal.
2. **Rotor:** recebe a força do vento retida pelas pás e movimenta-se de acordo com estas. Este movimento produz um conjugado proporcional à potência gerada e, por conseguinte, a energia.
3. **Nacele:** é a caixa portadora de sistemas de controle de freios, gerador, engrenagens, entre outros. Está acoplada ao rotor, no eixo central.
4. **Sensores de vento:** também conhecidos como anemômetro, são encontrados em turbinas horizontais *upwind* e determinam a intensidade da velocidade do vento em diferentes direções. São amplamente utilizados para fins de estudos de geração.
5. **Caixa multiplicadora:** faz a transformação da velocidade angular do rotor em uma velocidade maior para o gerador, amplificando o número de rotações através de um conjunto de engrenagens.
6. **Gerador:** máquina responsável por converter a energia mecânica do vento em energia elétrica.
7. **Sensor de direção:** encontrados em turbinas horizontais *upwind*, são utilizados para direcionamento das pás de maneira mais eficiente.
8. **Torre:** responsável por sustentar as pás e todo maquinário interno à nacele, em uma altura projetada. Também comporta a instalação elétrica necessária para transferência de energia.

2.2.2 Cálculo da eficiência de uma turbina eólica

O cálculo da eficiência de uma turbina eólica exige a relação entre a potência gerada, ou potência de saída da turbina, e sua potência de entrada. A potência de entrada é medida com a captação de energia cinética do vento feita pela turbina, que fornece o padrão do processo de geração. Sendo assim, é importante levarmos em consideração informações de velocidade do vento, área de cobertura da turbina e a densidade específica do fluxo de vento, por exemplo.

A energia cinética de entrada na turbina, é dada por

$$E_{cv} = \frac{1}{2}m_v v_v^2. \quad (2.12)$$

Sendo assim, a potência de entrada será

$$P_{in} = \frac{E_{cv}}{t}, \quad (2.13)$$

onde, substituindo a eq.(2.13) na eq.(2.12), teremos

$$P_{in} = \frac{1}{2} \frac{m_v v_v^2}{t}, \quad (2.14)$$

em que P_{in} é a potência de entrada, E_{cv} é a energia cinética de entrada, m_v é a massa de ar, v_v é a velocidade do vento e t é o tempo de atuação de E_{cv} .

Podemos descrever a massa do vento em termos de sua densidade específica, ρ , e volume, V . Com isso,

$$P_{in} = \frac{1}{2} \frac{\rho V v_v^2}{t}. \quad (2.15)$$

Podemos ainda descrever o volume do vento captado, pelo produto da área de varredura da turbina, A_s , com o produto da velocidade do vento com o tempo

$$V = A_s v_v t. \quad (2.16)$$

Substituindo a eq.(2.16) na eq.(2.15), teremos

$$P_{in} = \frac{1}{2} A_s \rho v_v^3. \quad (2.17)$$

A potência de saída, P_{out} , que é a potência captada pela turbina, é expressa pela diferença de energia cinética antes e depois da turbina (E_{in} e E_{out} , respectivamente), por unidade de tempo. Isto ocorre devido a velocidade do vento na região de conflito com a turbina ser maior em relação à velocidade a jusante da turbina. Assim, temos que a potência na turbina será

$$P_{out} = \frac{E_{in} - E_{out}}{t}, \quad (2.18)$$

ou ainda,

$$P_{out} = \frac{1}{2} \frac{m_v (v_v^2 - v_s^2)}{t}. \quad (2.19)$$

Reescrevendo m_v em termos de volume e densidade, teremos que o volume será expresso de acordo com a área de varredura da turbina e o produto de sua velocidade com o tempo. Ou seja,

$$P_{out} = \frac{1}{2} A_s \rho v_t (v_v^2 - v_s^2), \quad (2.20)$$

onde v_t é a velocidade do fluxo no plano de rotação do rotor.

Consideramos a velocidade na secção do rotor, pelo fato da potência extraída requerer apenas o fluxo na área de varredura da turbina.

Segundo a lei de Betz, a velocidade v_t pode ser interpretada como a média das velocidades v_v e v_s , ou seja,

$$v_t = \frac{v_v + v_s}{2}. \quad (2.21)$$

A eq.(2.21) foi demonstrada pelo teorema de rankine-froude.

Ao substituírmos a eq.(2.21) na eq.(2.20), teremos que

$$P_{out} = \frac{1}{2} A_s \rho \left(\frac{v_v + v_s}{2} \right) (v_v^2 - v_s^2). \quad (2.22)$$

A eficiência da turbina, η_{te} , é igual à relação entre a eq.(2.22) e a eq.(2.17). Logo,

$$\eta_{te} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_s^2}{v_v^2} \right) \left(1 + \frac{v_s}{v_v} \right). \quad (2.23)$$

Para a máxima eficiência, devemos calcular a taxa de variação no tempo, da eq.(2.23), igualada a zero. Isto significa que

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_s^2}{v_v^2} \right) \left(1 + \frac{v_s}{v_v} \right) \right] = 0. \quad (2.24)$$

Desenvolvendo a eq.(2.24), encontraremos

$$\frac{v_s}{v_v} = \frac{1}{3}. \quad (2.25)$$

Ao substituírmos a eq.(2.25) na eq.(2.23), observamos que a eficiência máxima da turbina, de acordo com a lei de Betz, é equivalente a 59,3%.

2.3 Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico é um sistema de geração de energia distribuída. Seu recurso renovável é a radiação que o sol emite, filtrada pela camada de ozônio para absorção de raios ultravioletas B (UVB). Ao irradiar em células compostas por cristais de silício, por exemplo, conectadas entre si, uma geração de potência elétrica ocorre por todo o aglomerado de células.

Na Figura 2, podemos observar que a geração fotovoltaica, dentre os meios de geração renovável apresentados, é a de menor percentual, tanto em 2020 quanto em 2021. Porém, existe uma grande expectativa de crescimento para este tipo de geração, visto que a mesma tem características de acessibilidade e rendimento que chamam a atenção de consumidores finais constantemente.

Existem diversos tipos de células fotovoltaicas preceituadas em tecnologias distintas, como as célula de cristal de silício monocristalino, cristal de silício policristalino, silício

amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS), células fotovoltaicas orgânicas (OPV), e células híbridas (HJT).

A partir da junção destas células e um processo de fabricação sofisticado, podemos obter o que denominamos de módulo fotovoltaico ou painel solar. O painel solar é constituído em diversos tamanhos e pode gerar valores distintos de potência elétrica, a depender de suas especificações de fabricação. Existem painéis que fazem aproveitamento da incidência da radiação solar em ambas as faces. Estes painéis são conhecidos como painéis bifaciais e podem chegar a gerar de 30% a 50% de energia adicional.

Na Figura 7, podemos notar a ilustração de uma reflexão da luz solar que incide na superfície. A relação entre a irradiação refletida e a irradiação na superfície, é conhecida como albedo, que diz respeito à capacidade reflexiva da superfície do terreno em relação a incidência de fótons. A reflexão do ponto de albedo considerado está sendo irradiada no verso do módulo, a fim de aumentar a taxa de geração no tempo. Uma outra situação de irradiação ilustrada, é através da radiação difusa. Alguns raios incidentes na superfície do painel abaixo da nuvem, contribuem com a taxa de geração do módulo onde se estão sendo consideradas as irradiações, originando uma irradiação difusa sobre o painel à esquerda.

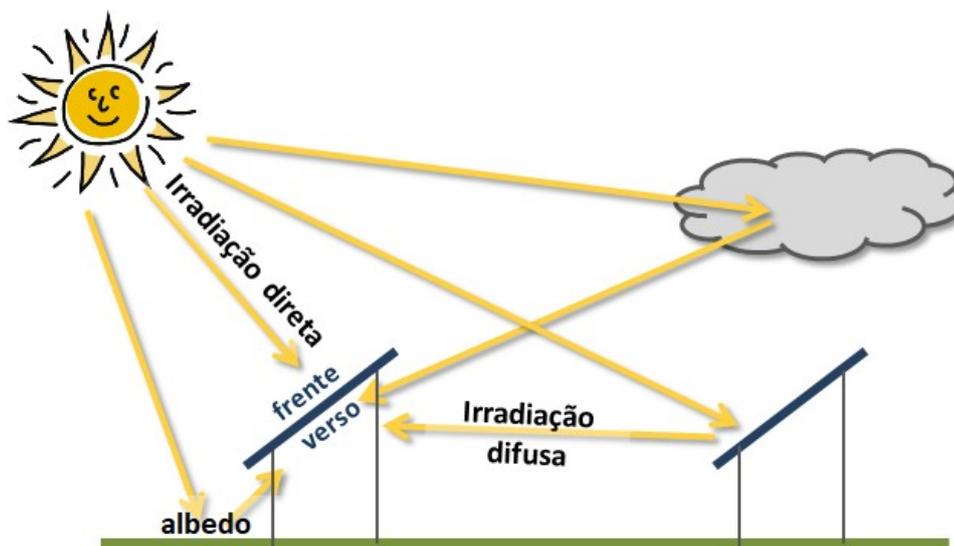


Figura 7 – Esquema de módulo bifacial em atividade. Imagem de domínio público.

2.3.1 Principais componentes de um sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico completo se dispõe de uma gama de componentes para compor funcionamento pleno com propostas de qualidade, eficiência e segurança. Com isso, podemos destacar alguns dos principais componentes utilizados nas instalações de sistemas fotovoltaicos em geral, tanto para sistemas *on-grid* quanto *off-grid*.

1. **Módulos (painéis) fotovoltaicos:** são constituídos de células dotadas de um

material semicondutor, em geral o silício, com características de geração de corrente e tensão elétrica a partir da irradiação da luz proveniente do Sol.

2. **Estruturas de suporte:** sustentam os módulos fotovoltaicos, permitindo a troca de gases e diminuição de temperatura na placa, com espaço para correntes de vento. Também servem como canalização para o aterramento, de possíveis descargas atmosféricas sobre os módulos.
3. **Controlador de carga:** tem como finalidade o controle de potência gerada, aproveitando o máximo de energia possível, desviando-se de perdas recorrentes. Uma outra funcionalidade está relacionada à proteção dos módulos fotovoltaicos, onde o objetivo de ratar pontos de maior geração, previne reversões de corrente.
5. **Bateria:** utilizada em sistemas *off-grid* ou micro-redes, tem como principal função o armazenamento de energia CC gerada nos módulos, servindo, geralmente, como fonte em períodos de geração nula, ou seja, períodos noturnos.
4. **Inversor:** grande parte da aplicação da geração fotovoltaica, é voltada a cargas de corrente alternada, CA. Porém, os módulos fotovoltaicos produzem energia CC, havendo portanto a necessidade de uma conversão de energia CC/CA. Assim, temos que o inversor torna-se bastante útil para este propósito, visto que sua atuação baseia-se na conversão da frequência nula, sinal CC, em uma frequência da rede, CA.
6. **DPS:** o DPS é um dispositivo de proteção contra surtos de descargas atmosféricas e é comumente utilizado em instalações fotovoltaicas, para a proteção da instalação.

3 Sistemas de Armazenamento, Controle e Conversão de Energia

3.1 Sistemas de Armazenamento

Os sistemas de armazenamento de energia são alternativas para abastecimento de cargas, em que as mesmas podem ou não serem adequadas às conexões com a rede de distribuição. A conexão permite que cargas sejam alimentadas majoritariamente sob fornecimento da rede de distribuição, em que ao apresentar eventuais contingências, a operação de alimentação das cargas passa a recorrer ao sistema de armazenamento. Para o caso da independência de cargas quanto a rede, o sistema de armazenamento torna-se um meio de fornecimento de energia associada, por exemplo, a sistemas renováveis para alimentação direta de cargas e/ou armazenamento eletroquímico.

Segundo a (ENERGÉTICA, 2019), os sistemas de armazenamento vêm ganhando grande notoriedade no sistema elétrico brasileiro devido a escassez de geração de energia por intermédio de reservatórios hidrelétricos. Isto implica que a utilização de sistemas de geração distribuída é vista como grande tendência para compor, futuramente, a matriz de energia elétrica com alto índice percentual.

Como se sabe, os sistemas de geração distribuída podem ser instalados no modo *off-grid*, onde a forma de alimentação da carga independe da rede de distribuição, recorrendo, de modo geral, a baterias recarregáveis. Assim, com a necessidade de armazenamento de energia previsto pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (ENERGIA, 2020), têm-se que o crescimento dos sistemas de geração distribuída, nessa perspectiva, propiciará a inclusão e o crescimento dos sistemas de armazenamento.

O sistema de armazenamento utilizado neste trabalho é uma bateria de Íon-Lítio, como segue na Figura 25, cuja demonstração teórica de funcionamento a partir de uma visão eletroquímica é apresentada na Figura 8.

A Figura 8 é um esquema da primeira bateria de Íon-Lítio comercializada e nela podemos notar o destaque dos elementos “Lítio” e “óxido de cobalto”. A partir da reação destes elementos para o armazenamento dos íons de lítio, características como uma maior disposição de potencial elétrico, longevidade e alta velocidade de carregamento, por exemplo, foram apresentadas de modo a classificar tal aglomerado químico como uma das principais tecnologias em estudo para armazenamento de energia (ROMÃO; CARVALHO; JUNIOR, 2020).

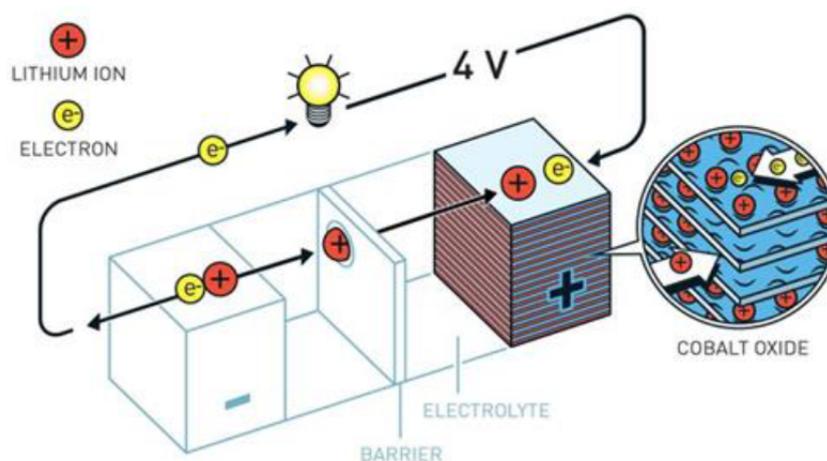


Figura 8 – Esquema de Bateria de Íon-Lítio. Imagem retirada de (ROMÃO; CARVALHO; JUNIOR, 2020).

3.2 Sistemas de Controle

Controle é o gerenciamento de sistemas cujas saídas devem estar em conformidade com os parâmetros de entrada desejados. Podemos presenciar ações de controle em diversos setores do desenvolvimento industrial, comercial, social, entre outros. Para sistemas elétricos, por exemplo, podemos citar sistemas de geração de energia elétrica, que são essenciais para manutenção de produtos e realização de atividades.

Entre os vários tipos de sistemas existentes em um sistema de geração de energia elétrica, podemos citar o sistema de controle, que realiza o monitoramento da potência gerada, por exemplo em sistemas fotovoltaicos e eólicos. Além do monitoramento de potência, em sistemas eólicos o controle também está diretamente relacionado à posição da turbina, onde através de sensores de vento, pode indentificar o direcionamento adequado da turbina para a captação de energia com maior rendimento.

Segundo (OGATA, 2011), para melhor compreensão dos sistemas de controle é essencial que entendamos alguns conceitos introdutórios que o compõem, tais como a **variável controlada e sinal de controle ou variável manipulada**, que correspondem ao objeto a ser controlado e ao parâmetro ajustável que exerce influência sobre a variável controlada, as **plantas**, que são compostas pelo planejamento de interação entre os dispositivos e/ou equipamentos, os **processos**, objetivos a serem atingidos para o cumprimento de determinada atividade, os **sistemas**, compostos por toda a massa integrante do projeto, os **distúrbios**, que são ruídos ou erros na planta do sistema e o **controle com realimentação**, que remonta a atuação da saída do sistema aos processos do mesmo, interferindo nas variáveis de entrada e assim constituindo uma saída desejada (o que define um sistema de malha fechada).

O sistema de controle apresentado para o circuito deste projeto, é um sistema em malha fechada que atua sobre diversas partes. Os componentes que realizam a realimentação

do sistema são os sensores de tensão, que em pontos distintos do circuito realizam leituras de tensão e através do código fonte informam aos módulos relés, conectados aos devidos sensores, como devem ser sucedidos seu modo de operação.

3.3 Sistemas Conversores de Energia

Segundo (RASHID, 1999) e (AHMED, 2000), para o controle ou condicionamento da energia elétrica, é necessária a conversão da potência elétrica de uma forma para outra, e as características de chaveamento dos dispositivos de potência permitem isso (LU et al., 2012). Os conversores estáticos de potência realizam essas funções de conversão de energia. Um conversor pode ser considerado uma matriz de chaveamento em que uma ou mais chaves são ligadas e conectadas à fonte de alimentação para a obtenção da tensão ou da corrente desejada na saída. Os circuitos de eletrônica de potência podem ser classificados em seis tipos:

1. Retificadores a diodo
2. Conversores CC-CC (choppers CC)
3. Conversores CC-CA (inversores)
4. Conversores CA-CC (retificadores controlados)
5. Conversores CA-CA (controladores de tensão CA)
6. Chaves estáticas

Os dispositivos nos conversores a seguir são utilizados apenas para ilustrar os princípios básicos. A ação de chaveamento de um conversor pode ser realizada por mais de um dispositivo. A escolha de um dispositivo específico depende das exigências de tensão, corrente e velocidade do conversor.

3.3.1 Conversores CC-CC

Um conversor CC-CC também é conhecido como chopper ou regulador chaveado, veja a Figura 9. Quando o transistor Q_1 é ligado pela aplicação da tensão V_{GE} na porta, a tensão de alimentação CC é conectada à carga e a tensão instantânea de saída é $v_o = +V_s$. Quando o transistor Q_1 é desligado pela remoção da tensão V_{GE} na porta, a tensão CC é desconectada da carga e a tensão de saída instantânea é $v_o = 0$. A tensão média de saída torna-se $V_o(MED) = t_1 V_s / T = d V_s$. Portanto, a tensão média de saída pode variar pelo controle do ciclo de trabalho. A tensão média de saída, v_o , é controlada pela variação do tempo de condução t_1 do transistor Q_1 . Se T é o período de operação do conversor, então

$t_1 = dT$. d é conhecido como ciclo de trabalho ou razão cíclica do conversor (RASHID, 1999).

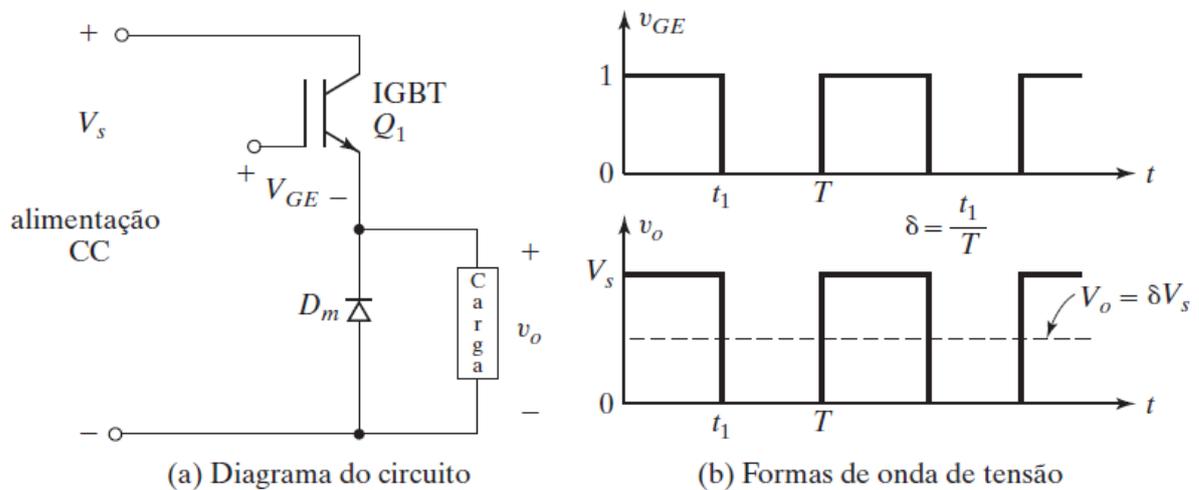


Figura 9 – Conversor CC-CC. Imagem retirada de (RASHID, 1999).

3.3.2 Conversores CC-CA

De acordo com (AHMED, 2000) os conversores CC-CA são conhecidos como inversores. A função de um inversor é alterar uma tensão de entrada CC e transformá-la em uma tensão de saída CA simétrica, com amplitude e frequência desejadas. A tensão de saída pode ser fixa ou variável em uma frequência fixa ou variável. Uma tensão de saída variável pode ser obtida pela variação da tensão de entrada CC, mantendo-se o ganho do inversor constante. Por outro lado, se a tensão de entrada CC for fixa e não controlável, uma tensão de saída variável pode ser obtida pela variação do ganho do inversor, o que normalmente é conseguido com o controle da modulação por largura de pulso (pulse-width-modulation — PWM) no inversor. O ganho do inversor pode ser definido como a relação entre a tensão de saída CA e a tensão de entrada CC.

A forma de onda da tensão de saída de um inversor ideal deve ser senoidal (JIAN-GUO; LONG-FU; DE-RONG, 2011). Na prática, porém, ela não é senoidal e contém determinadas harmônicas. Para aplicações de baixa e média potência, tensões com onda quadrada ou quase quadrada podem ser aceitáveis, mas para aplicações de alta potência são necessárias formas de onda senoidais com baixa distorção. Com a disponibilidade de dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, os conteúdos harmônicos da tensão de saída podem ser significativamente minimizados ou reduzidos por meio de técnicas de chaveamento como apresentado na Figura 10b.

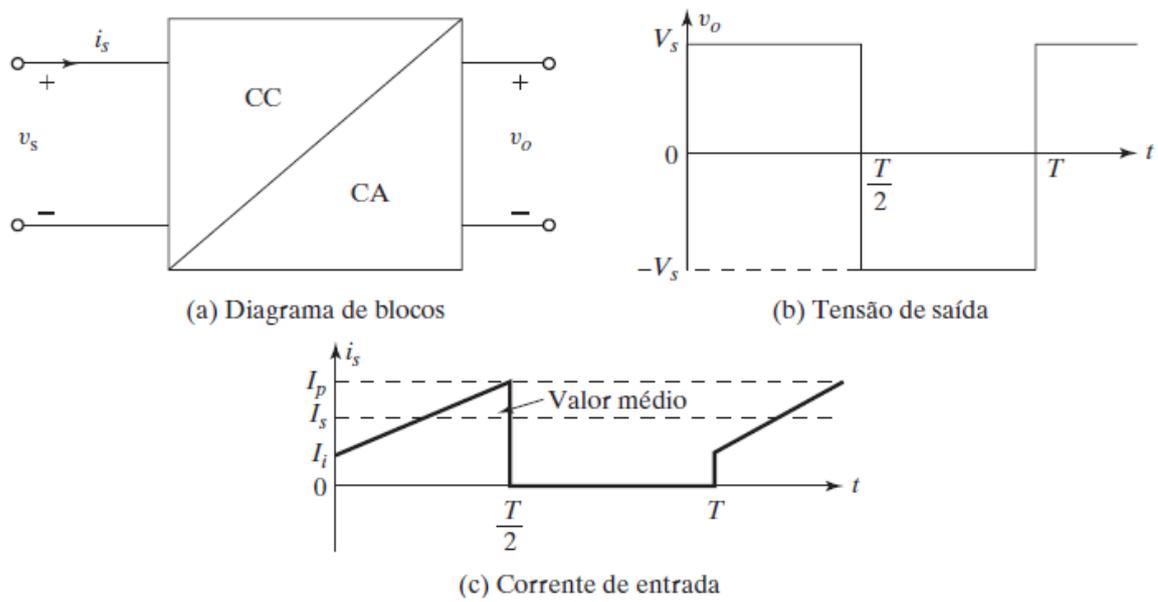


Figura 10 – Conversor CC-CA. Imagem retirada de (RASHID, 1999).

3.3.3 Inversores Monofásicos em Ponte

Um inversor de tensão (voltage - source inverter — VSI) monofásico em ponte é mostrado na Figura 11a. Ele é composto por quatro pulsadores. Quando os transistores Q_1 e Q_2 são ligados simultaneamente, a tensão de entrada V_s aparece na carga. Se os transistores Q_3 e Q_4 são ligados ao mesmo tempo, a tensão na carga é invertida e passa a ser $-V_s$. A forma de onda para a tensão de saída é indicada na Figura 11b.

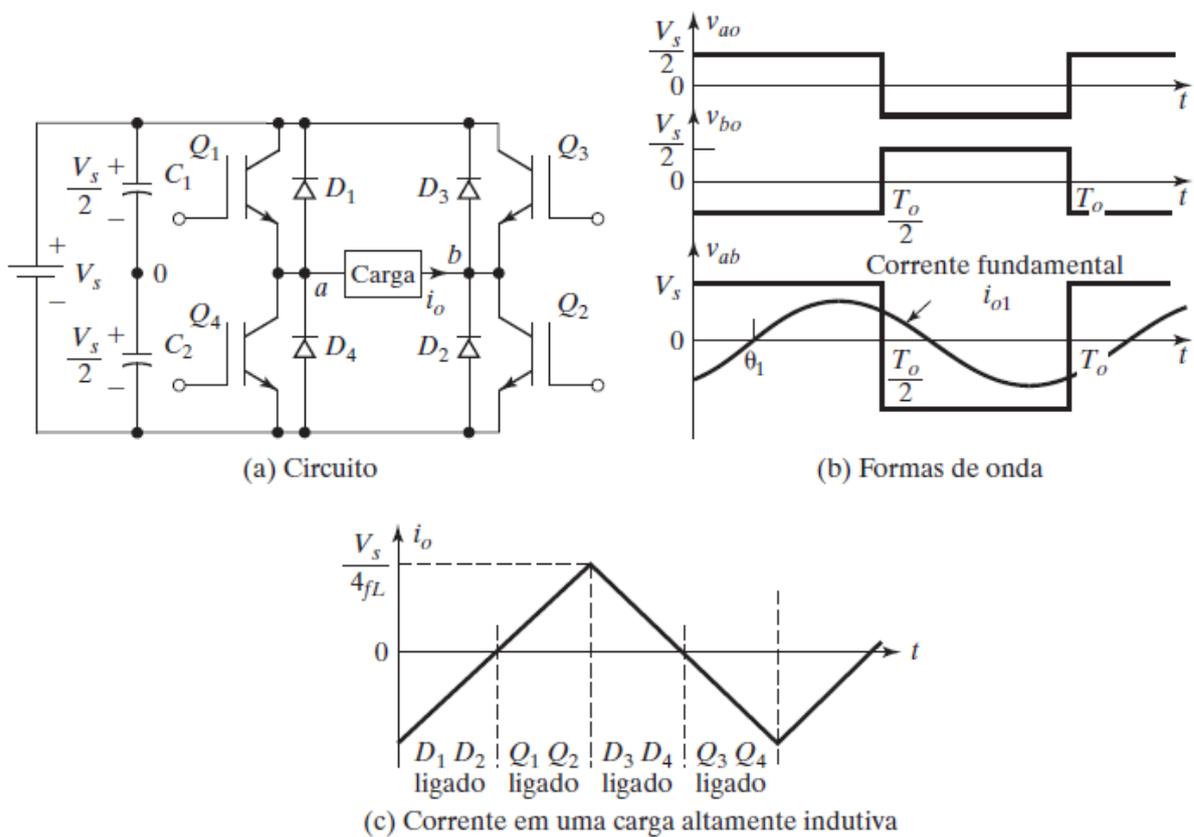


Figura 11 – Inversor monofásico em ponte completa. Imagem retirada de (RASHID, 1999).

4 Componentes Eletrônicos do Projeto

Neste capítulo iremos apresentar todos os materiais utilizados no sistema ininterrupto, desde componentes eletrônicos básicos e máquinas elétricas a circuitos de conversão.

4.1 Resistor

O resistor tem como função primária a limitação de corrente elétrica em circuitos elétricos. Pode ser utilizado em associação série e associação paralelo, onde a partir destas são introduzidos circuitos com divisor de tensão e divisor de corrente. A lei matemática que define os resistores em termos de grandezas elétricas, é apresentada a seguir

$$R = \frac{V}{I}. \quad (4.1)$$

Esta é a lei de Ohm, onde R representa uma resistência elétrica, V é uma diferença de potencial e I é a corrente elétrica.



Figura 12 – Resistor de 1kΩ. Imagem de domínio público.

4.2 Capacitor

Trata-se de um elemento passivo e de armazenamento de energia, amplamente utilizado como filtro passa baixa (capacidade de bloquear altas frequências de um sinal) e filtro passa alta, cuja finalidade é inversa ao do filtro passa baixa. Seu princípio de funcionamento baseia-se no acúmulo de cargas elétricas entre duas placas paralelas com material dielétrico. Veja o capacitor na Figura 13.

Uma equação característica da tensão no capacitor, é descrita a seguir

$$i_c = C \frac{dv}{dt}, \quad (4.2)$$

onde i_c é a corrente elétrica no capacitor, C é a capacitância, v é a tensão elétrica e t é o tempo de duração da tensão no capacitor.

Podemos notar na eq.(4.2), que um sinal contínuo de tensão torna a taxa de variação da tensão nula. Nestas condições, o capacitor comporta-se como um circuito aberto.



Figura 13 – Capacitor eletrolítico de $1000\mu F$ e $50V$. Imagem de domínio público.

4.3 Indutor

Semelhante ao capacitor, o indutor, observe a Figura 14, é um elemento armazenador de energia, utilizado em diversas aplicações, tais como transformadores e motores, por exemplo. Suas características elétricas básicas estão relacionadas a eq.(4.3), em que circuitos de fonte CC fazem do indutor um curto-circuito, visto que o valor de uma corrente contínua é constante.

$$v_{ind} = L \frac{di}{dt}, \quad (4.3)$$

em que v_{ind} é a tensão no indutor, L é a indutância, i é a corrente elétrica e t é o tempo de duração da corrente no indutor.

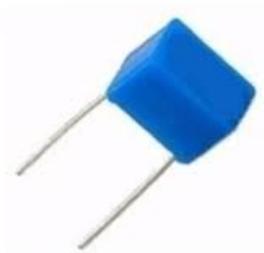


Figura 14 – Indutor micro choque. Imagem de domínio público.

4.4 Diodo de silício

O diodo, representado na Figura 15, é um dispositivo de circuito, cuja tensão de operação varia de acordo com o material semicondutor utilizado para fabricação. O semicondutor para este caso é o silício, que tem como tensão inicial de operação valores próximos a $0.7V$.

Uma característica notável do diodo de silício, está relacionado à polaridade do mesmo. Quando reversamente polarizado, o diodo torna-se um circuito aberto, característica

que o define em várias aplicações como dispositivo de proteção para cargas em casos de correntes de falta.

A corrente no diodo pode ser expressa da seguinte forma

$$I_D = I_s \left(e^{V_D/\eta V_T} - 1 \right), \quad (4.4)$$

em que I_D é a corrente no diodo, I_s é a corrente de saturação reversa, V_D é a tensão de polarização direta no diodo, e η é um fator de idealidade relativo a condições de operação e construção do diodo, e V_T é a tensão térmica.



Figura 15 – Diodo de silício. Imagem de domínio público.

4.5 Transistor

É um dispositivo de chaveamento baseado em configurações de materiais semicondutores. Como exemplo podemos destacar o *BC546*, observe a Figura 16, utilizado no projeto, onde este é um transistor de configuração *NPN*, ou seja, com arranjo de junção entre dois materiais do tipo *N* e dois materiais do tipo *P*. Quando não polarizado, pode ser visto como dois diodos interconectados, sendo um diodo *NP* e outro *PN*, ambos conectados através do material do tipo *P*.



Figura 16 – Transistor *BC546*. Imagem de domínio público.

4.6 Varistor

O varistor, veja a Figura 17, tem comportamento exponencial relacionado a variação de tensão e resistência. É visto como um resistor variável que não obedece a lei de Ohm, eq.(4.1), pois sua resistência é inversamente proporcional à tensão na carga com a qual estabelece uma conexão em paralelo. Estas características definem o varistor como um dispositivo de proteção de circuitos contra sobretensões, onde à medida em que a tensão aumenta em um ponto específico, a resistência do varistor, em paralelo com este ponto, diminui, gerando então um curto-circuito.



Figura 17 – Varistor de 270V. Imagem de domínio público.

4.7 Fusível

Dispositivo de proteção contra sobrecorrentes em circuitos. Sua instalação é convencionalmente em série com um ponto do circuito ou componente a ser protegido, de modo que o filamento metálico, a uma temperatura relacionada a alta corrente, é rompido por efeito Joule. O fusível pode ser observado na Figura 18.



Figura 18 – Fusível de 4A. Imagem executada pelo autor.

4.8 Transformador monofásico 12V-220V

Este transformador monofásico em específico, observe a Figura 19, tem por finalidade a transformação de uma tensão de 12V em uma tensão de 220V. A transformação ocorre

devido ao número de espiras no primário ser menor o suficiente para amplificar o módulo da tensão no secundário. A relação entre o número de espiras no secundário e primário do transformador, reflete na relação entre a tensão de saída e de entrada estabelecida no mesmo.

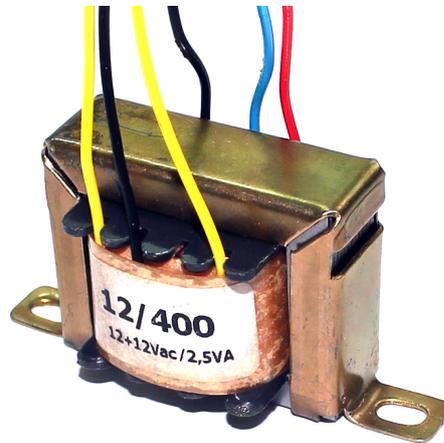


Figura 19 – Transformador monofásico 12V-220V. Imagem de domínio público.

4.9 Placa Arduino Uno

A placa Arduino Uno, encontrada na Figura 20, é composta por microprocessadores, memória RAM, memórias de programa, conversores A/D, osciladores, entradas para alimentação, pinos de reset, CPU, GPIO, dentre outros. Também é adepto da linguagem de programação *C++* e possui como microcontrolador o CI (Circuito Integrado) *ATEMEGA328P*.

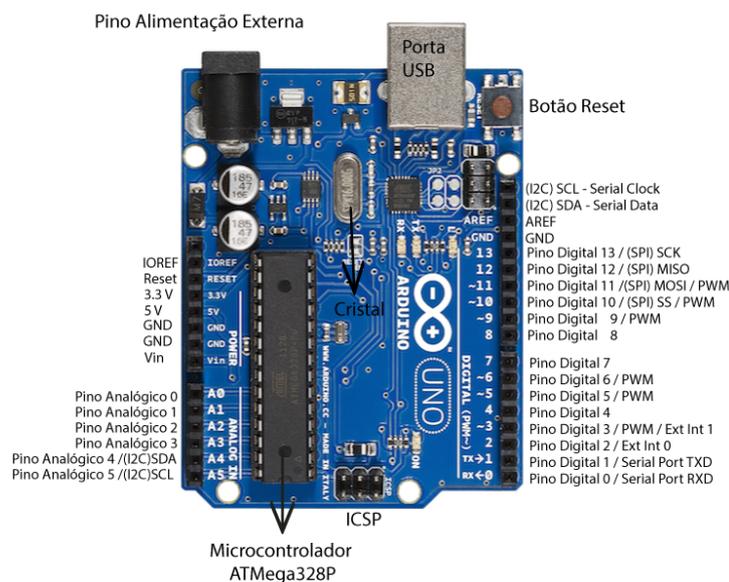


Figura 20 – Placa Arduino Uno. Imagem de domínio público.

4.10 Módulo Relé de 4 canais

Elaborado com a integralização de quatro relés, o módulo relé de 4 canais, veja a Figura 21, é um dos dispositivos controlados a partir de acionamentos via códigos estabelecidos na *IDE* do Arduino Uno. O ponto de conexão entre ambos é designado a partir dos pinos de saída *IN*, na saída de cada relé, e as entradas digitais do Arduino Uno. Outros pinos na saída do relé são relacionados ao V_{cc} de 5V, recebidos do arduino, e o pino de *GND*, definindo o mesmo ponto comum para ambos.

O sinal de entrada do módulo relé pode ser atribuído aos canais descritos como normalmente aberto *NO*, normalmente fechado *NC* e o ponto comum *COM*, conectado ao comum da fonte.



Figura 21 – Módulo Relé de 4 canais. Imagem de domínio público.

4.11 Sensor de tensão CC

O sensor de tensão CC, representado na Figura 22, como o próprio nome sugere, identifica tensões contínuas específicas e envia ao arduino. Através deste sensor, podemos manter o controle de tensão no circuito enviando tais informações para dispositivos de proteção, por exemplo. Seus pinos de entrada são o V_{cc} e o *GND* da fonte de tensão e seus pinos de saída são o *Sinal*, que transfere a tensão de entrada para o arduino em forma de sinal analógico, e o *GND*, estabelecendo um ponto comum entre ambos.



Figura 22 – Sensor de tensão CC. Imagem de domínio público.

4.12 Motor CC de 250W

O motor CC, veja a Figura ??, é uma máquina elétrica que recebe energização para a geração de energia mecânica. A energização ocorre por intermédio de uma fonte CC, conectada a escovas que conduzem corrente elétrica para o comutador e excitam o estator da máquina, rotacionando o eixo central da mesma, produzindo movimentação mecânica de saída.



Figura 23 – Motor CC de 250W. Imagem executada pelo autor.

4.13 Gerador CC de 120W

O gerador CC, como podemos observar na Figura 24, é responsável pela potência gerada em um determinado circuito. Através da interação entre seus componentes internos, podemos obter em distintas maneiras a excitação do campo magnético no estator e com isso, os parâmetros de projeto desejados. Este gerador em especial, é acionado pelo motor da Figura x, como veremos no próximo capítulo deste trabalho.



Figura 24 – Gerador CC de 120W. Imagem executada pelo autor.

4.14 Bateria de íon-Lítio

Baterias de íon-Lítio, veja a Figura 25, são baterias recarregáveis de armazenamento promissor, do ponto de vista de tempo de carga e capacidade, em que os íons de Lítio figuram pelos terminais através do eletrólito. Em específico, esta bateria é formada por três pilhas recarregáveis de íon-lítio, com $4.2V$ e $6300mAh$ cada.

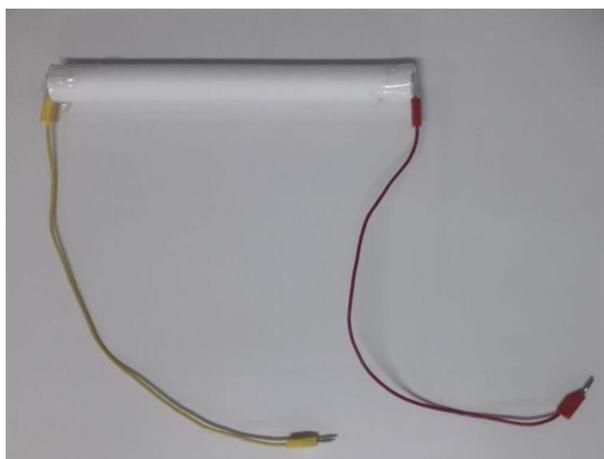


Figura 25 – Bateria de íon-Lítio de aproximadamente 12V. Imagem executada pelo autor.

5 Projeto do Sistema de Controle de Geração, Armazenamento e Carga

A metodologia proposta para o projeto é apresentada e discutida neste capítulo. Em termos dos principais elementos que compõem o sistema ininterrupto de controle eletrônico, a abordagem proposta é apresentada e, em segundo momento, apresenta-se uma sequência destas teorias na formalização do projeto proposto.

Inicialmente, faremos uma descrição do sistema de geração e regulação de tensão para o circuito, de modo que a operação dos demais blocos seja atendida em média pelo valor de tensão regulado. Em seguida, apresentamos o desenvolvimento do sistema inversor monofásico por meio do gerador de função de onda quadrada.

De forma generalizada, na quarta seção é abordado o método para projeto do controladores via programação do arduino, consistindo da formulação do problema de controle e sua solução por meio do chaveamento e medições de tensão CC e CA.

5.1 Conjunto Motor-Gerador CC do sistema

Na Figura 26, mostramos o acoplamento de máquinas elétricas de alimentação e geração elétrica. À direita, temos o motor CC, acionado a partir de uma fonte variável de tensão CC, que é alimentada por um *Variac*. À esquerda, temos o gerador, cujo rotor é acionado pela rotação do eixo central do motor e que alimenta todo o circuito com a tensão gerada. O sistema acoplado é interligado em série a um medidor de corrente da bancada utilizada. Podemos acompanhar as conexões na Figura como em (CHUNG et al., 2023).

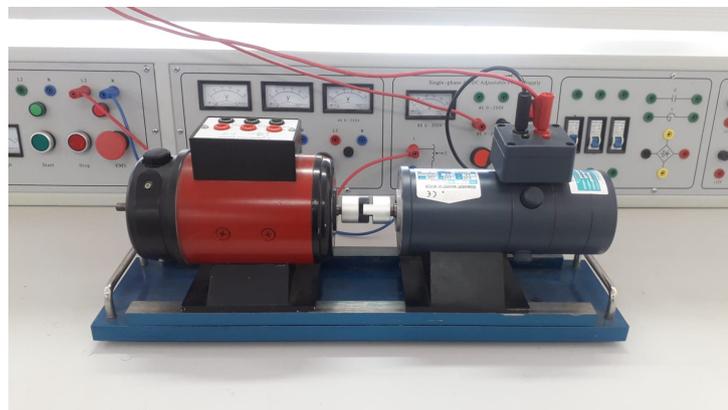


Figura 26 – Motor-gerador. Imagem executada pelo autor.

5.2 Regulagem da Tensão CC

O regulador *LM7812* é o responsável por estabilizar a saída do CI para uma tensão contínua de 12V. A entrada está sendo submetida a uma variação do gerador, que pode chegar próximo de 30V contínua. A partir de 15V, o sistema passa a regular a tensão para 12V. O regulador também precisa de limite máximo de tensão e capacitores que filtrem os ruídos como mostrado na Figura 27.

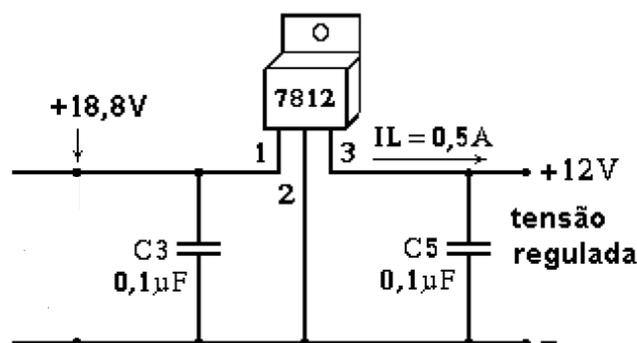


Figura 27 – Regulador LM7812. Imagem executada pelo autor.

Na Figura 43 é representada a interconexão entre o regulador de tensão e alguns dispositivos de proteção, fusível de 4A e varistor. Foram colocados diodos na entrada e *GND* do circuito, como forma de prevenção contra correntes de falta, alguma energização contrária ao sentido convencional. A entrada está conectada à fonte de tensão e a saída ao inversor e bateria. Observe o diagrama do circuito no apêndice A.

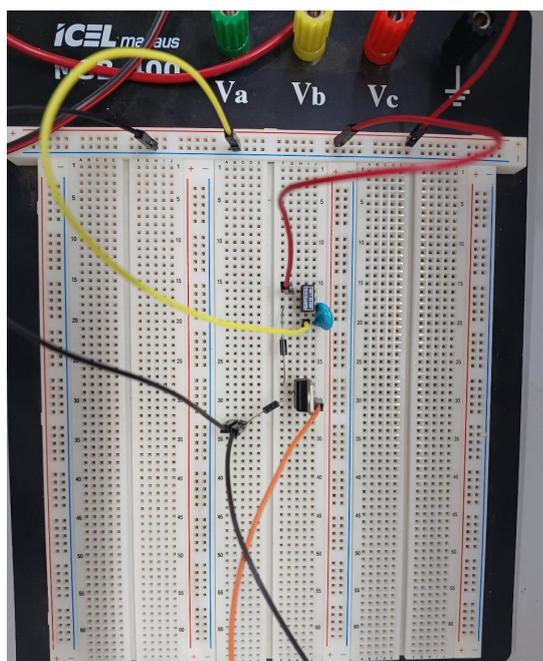


Figura 28 – Regulador LM7812 na protoboard. Imagem executada pelo autor.

5.3 Comparador de Sinais

O comparador de sinais tem como objetivo a geração de sinais PWM (Modulação por Largura de Pulso) através da comparação de um sinal triangular com um sinal senoidal. O sinal resultante é constituído pela diferença de potencial entre as magnitudes dos sinais de entrada em um período de tempo designado, onde o pulso de saída pode ser utilizado para o controle de chaveamento de circuitos com transistores, por exemplo.

Na aplicação deste projeto, o circuito comparador de sinais realizou o controle de pulso dos transistores do inversor de frequência, em que os sinais gerados foram transmitidos a partir do circuito apresentado na Figura 29, composto por dois amplificadores operacionais, resistores de $1k\Omega$ e uma porta lógica *NOT*. O motivo da utilização de dois amplificadores é a geração de sinal PWM para duas associações de transistores, onde dois transistores eram acionados através de sua base em um tempo distinto dos outros dois transistores. Observe o diagrama do circuito no apêndice B.

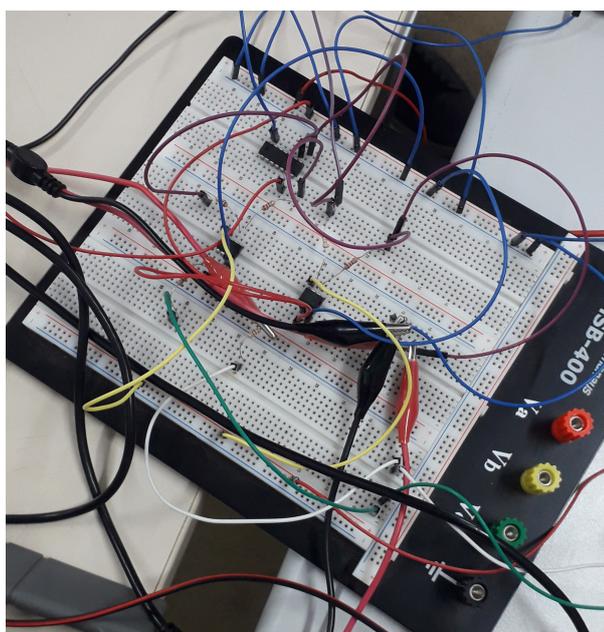


Figura 29 – Comparador de Sinais. Imagem executada pelo autor.

5.4 Inversor Monofásico 12V-220V

De acordo com (AHMED; KHAN, 2021), o inversor tem a função de transformar uma tensão contínua em uma tensão variável que permite o uso de aparelhos monofásicos. Como podemos observar, isso torna a energia ininterrupta devido a bateria estar sendo abastecida pela fonte e fornecendo energia às carga monofásicas, como apresentado em (BROOK; MORTON, 1988).

O inversor encontrado na Figura 30, é constituído por quatro transistores, que recebem um pulso *PWM* do temporizador 555. Na base dos mesmos estão resistores de

$1k\Omega$, sendo a base do transistor 1 conectada à base do transistor 4 e a base do transistor 2 conectada à base do transistor 3. Esta conexão de bases, reflete o compartilhamento de pulsos recebidos. O coletor do transistor 1 está conectado ao coletor do transistor 3 e seus emissores estão em comum com um ramo de circuito de filtro, com capacitor de $470\mu F$ em paralelo com resistor de $1k\Omega$, em série com um indutor de $220\mu H$. Os coletores dos transistores 2 e 4 também estão conectados aos terminais deste circuito de filtro. E o emissor de ambos, está aterrado. Observe o diagrama do circuito no apêndice C.

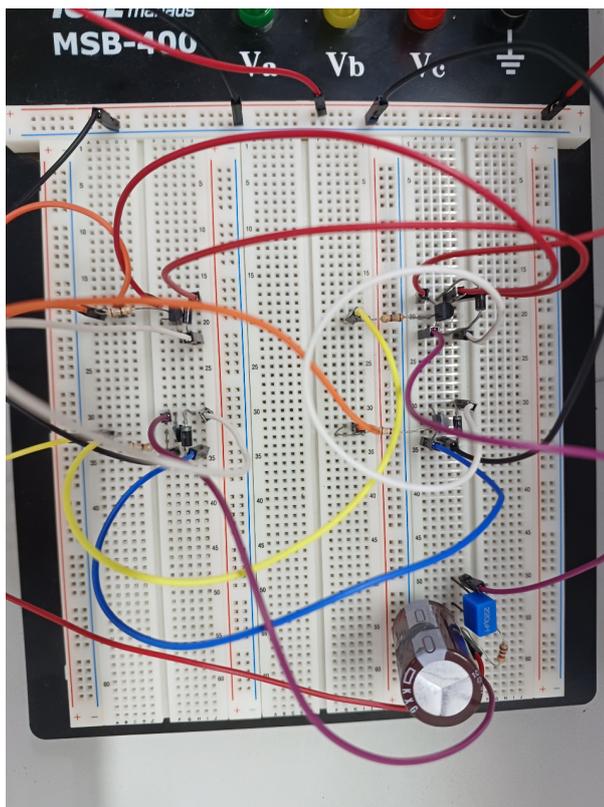


Figura 30 – Inversor. Imagem executada pelo autor.

A Figura 31, é um esquema reproduzido do inversor de frequência com sinal CC de $12V$ de entrada, e podemos detectar o circuito encontrado na Figura 30, cujos pulsos estão sendo regidos pelo temporizador e há uma conexão também com um transformador elevador de tensão na saída, elevação para $220V$.

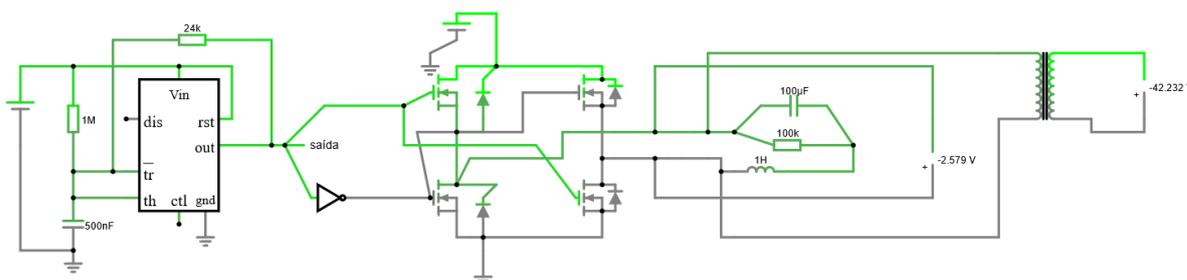


Figura 31 – Inversor Monofásico 12V-220V. Imagem executada pelo autor.

5.5 Controle do sistema

O controle do sistema é estabelecido pelo microcontrolador *ATEMEGA328* junto aos demais componentes e funcionalidades da placa arduino. Neste sistema de controle estão incluídos módulos relés e sensor de tensão para monitoramento da tensão e acionamento dos relés de acordo com as tensões limites registradas como excedentes no código criado. À medida que o sensor de tensão detecta uma sobretensão em algum ponto do circuito, o relé interconectado ao determinado ponto dispara. Observe o circuito de controle no projeto, através da Figura 41.

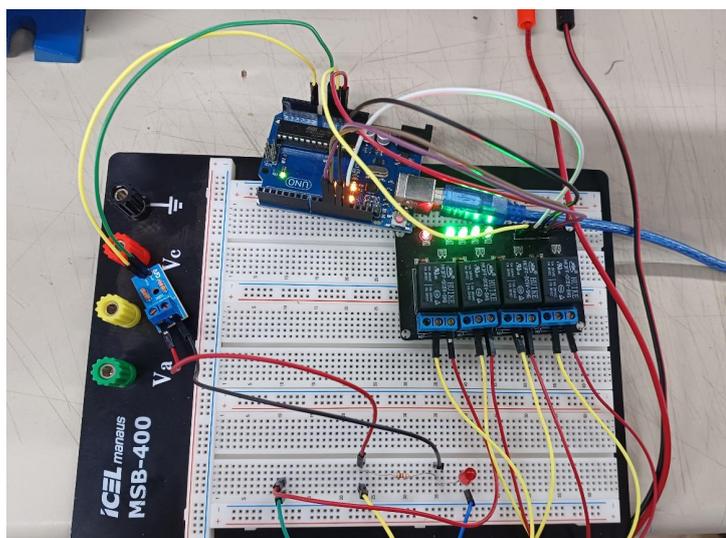


Figura 32 – Controle do Sistema.

5.6 Fluxograma do Sistema

O fluxograma na Figura 33, é o sistema completo, resumidamente, em diagrama de blocos. Neste presenciamos o motor CC, energizado com 110V, cuja saída é monitorada pelo sistema de controle e também é acoplada ao gerador CC, do gerador CC percebemos uma conexão com o regulador de tensão de 12V e controlador, onde teremos que na entrada do regulador, também haverá monitoramento da tensão. Um esquema desta parte do circuito pode ser observado com os dispositivos de proteção do mesmo, onde uma não atuação do controlador, por exemplo, gera a atuação do varistor.

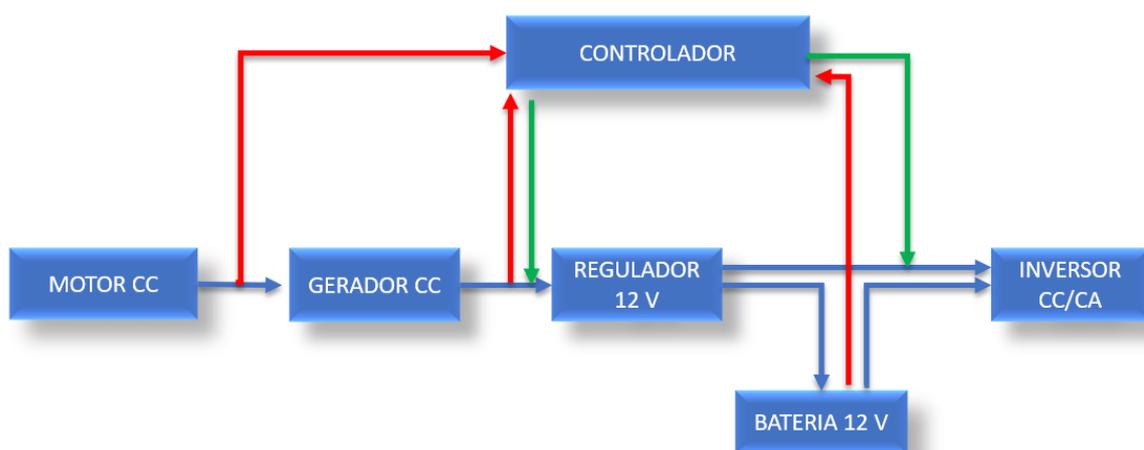


Figura 33 – Fluxograma do Sistema.

6 Resultados

6.1 Execução do Projeto

Com o desenvolvimento dos circuitos apresentados no capítulo 5, uma associação de ambos foi realizada e assim composto o circuito final do sistema ininterrupto de controle. Na Figura 34, vemos o sistema com fonte de alimentação CC produzida a partir do motor-gerador apresentado na Figura 26. Inicialmente os testes mostravam uma geração de aproximadamente 17V CC, em que utilizávamos um regulador de 12V no circuito da Figura 43 para a estabilização do sistema em tensões próximas a 12V. Porém, nos últimos testes, o gerador apresentou uma ineficiência de geração com queda de 8V, ou seja, passava-se a apresentar nos equipamentos de medições, 9V. O regulador de tensão de 12V também apresentou falhas em seu funcionamento, onde optamos por utilizar um regulador de 5V. Assim, com um regulador de 5V, obtivemos uma tensão próxima de 5V para a alimentação do circuito.

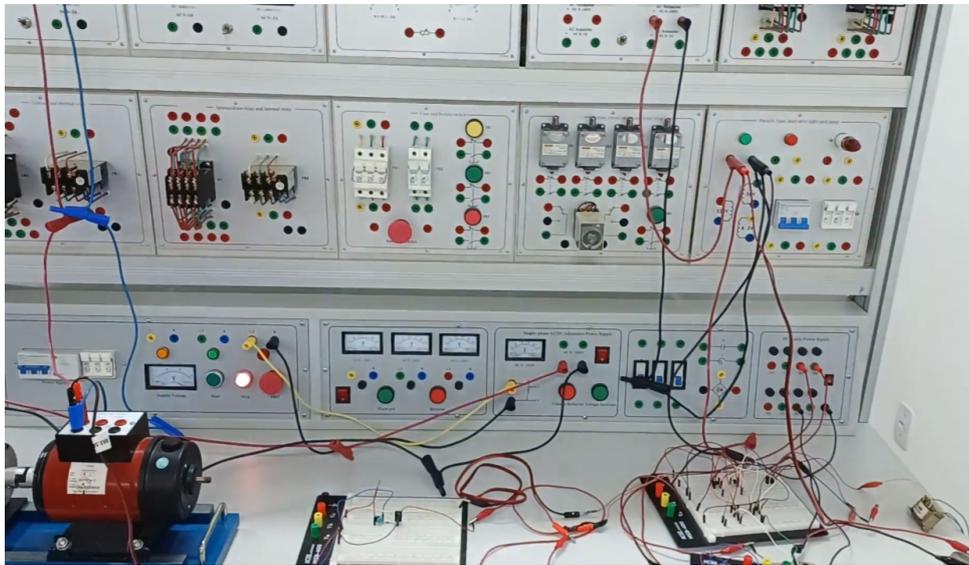


Figura 34 – Sistema de controle ininterrupto alimentado a partir do motor-gerador. Imagem reproduzida pelo autor.

Foi-se realizada uma conexão em paralelo do gerador com um medidor de tensão CC digital da bancada de máquinas elétricas utilizada. Com isso, verificamos se a tensão no gerador estava compatível com a nova tensão estimada para alimentação do sistema ininterrupto de controle. Veja a Figura 35.

Na Figura 35 observamos que 9V foram registrados, ou seja, o valor obtido encontra-se dentro do limite permitido estipulado no *datasheet* do regulador.

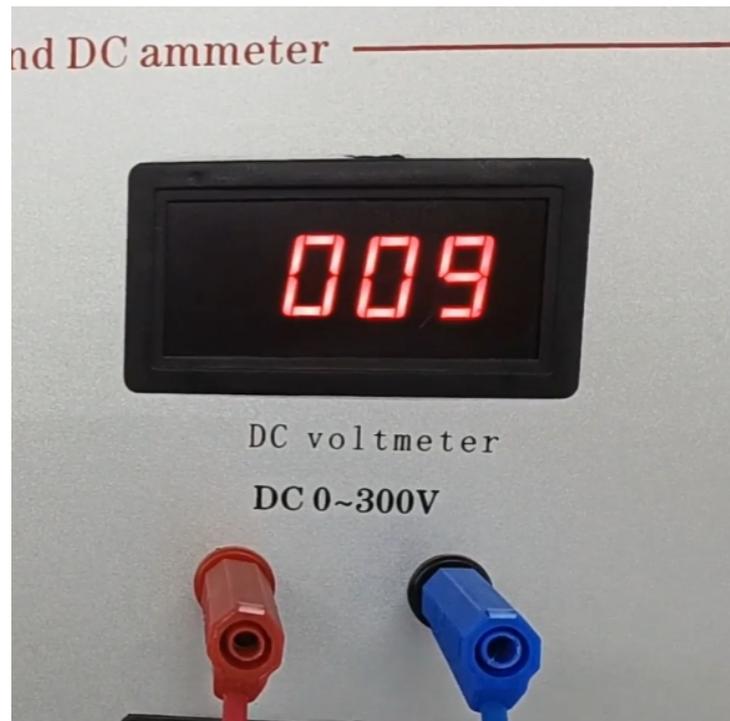


Figura 35 – Tensão no gerador. Imagem reproduzida pelo autor.

A saída medida a partir do gerador como fonte CC foi registrada em aproximadamente 5,5V CA, como podemos observar na Figura 36.



Figura 36 – Tensão na carga alimentada a partir do motor-gerador. Imagem reproduzida pelo autor.

Separadamente do sistema de geração, o circuito foi alimentado com a bateria designada para alimentação alternativa do sistema ininterrupto de controle. O sistema de geração não foi conectado diretamente ao sistema de armazenamento, bateria, pelo motivo dos dois sistemas obterem níveis distintos de tensão. Deste modo, podemos acompanhar na Figura 37 o esquema de montagem do circuito com fonte CC de alimentação a partir da bateria de aproximadamente 13,6V.

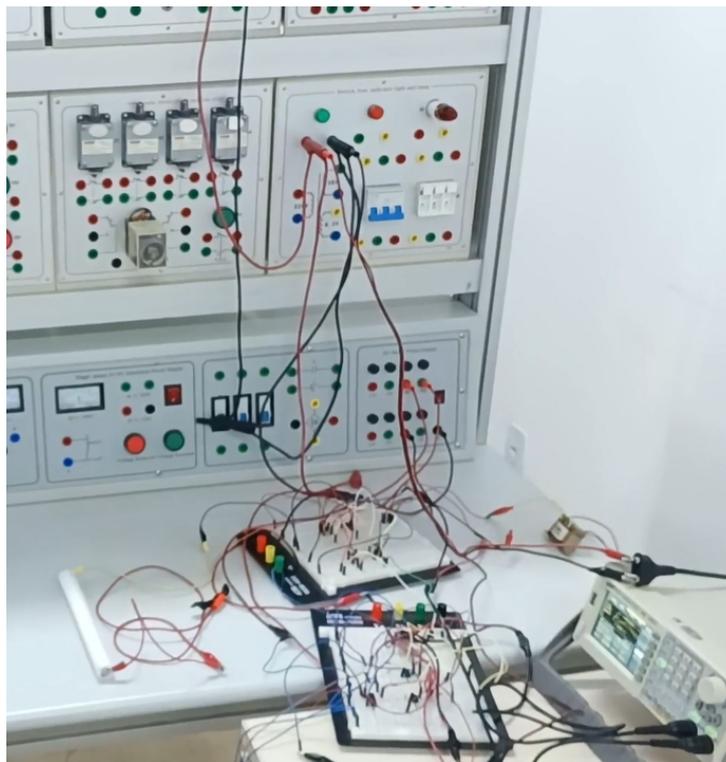


Figura 37 – Sistema de controle ininterrupto alimentado a partir de uma bateria. Imagem reproduzida pelo autor.

A tensão de saída na carga a partir da fonte CC através da bateria, foi obtida como segue na Figura cv, onde temos um registro de aproximadamente 13V medidos. Veja a Figura 38.



Figura 38 – Tensão na carga alimentada a partir da bateria. Imagem reproduzida pelo autor.

A carga mencionada anteriormente é uma lâmpada de led verde da bancada de máquinas elétricas, a qual, como podemos observar na Figura bn, foi acionada com a

aplicação dos dois níveis de tensão CA citados, observe a Figura 39. Porém, quando submetida à tensão CA de 5,5V, a lâmpada adota uma oscilação perceptível de sua intensidade.



Figura 39 – Carga acionada. Imagem reproduzida pelo autor.

A geração do sinal PWM de ativação da porta de base dos transistores foi realizada a partir de um gerador de funções, em que houve a propagação de um sinal triangular e de um sinal senoidal nas portas de entrada dos amplificadores, como podemos observar na Figura 40.

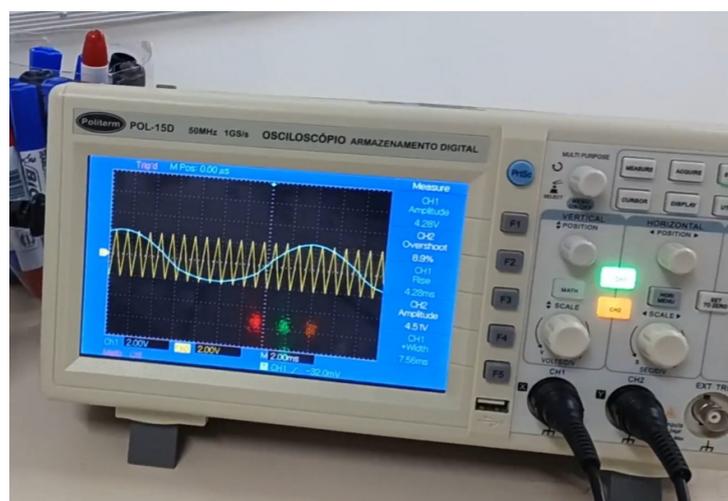


Figura 40 – Entrada triangular e senoidal do comparador de sinais. Imagem reproduzida pelo autor.

6.2 Planta do sistema

A Figura 41 apresenta o circuito completo, considerando o controle via microcontrolador, onde podemos observar todos os componentes do circuito. A programação é feita por arduino, onde se monitora as tensões de entrada do gerador, da entrada da bateria, da entrada do inversor e saída do inversor.

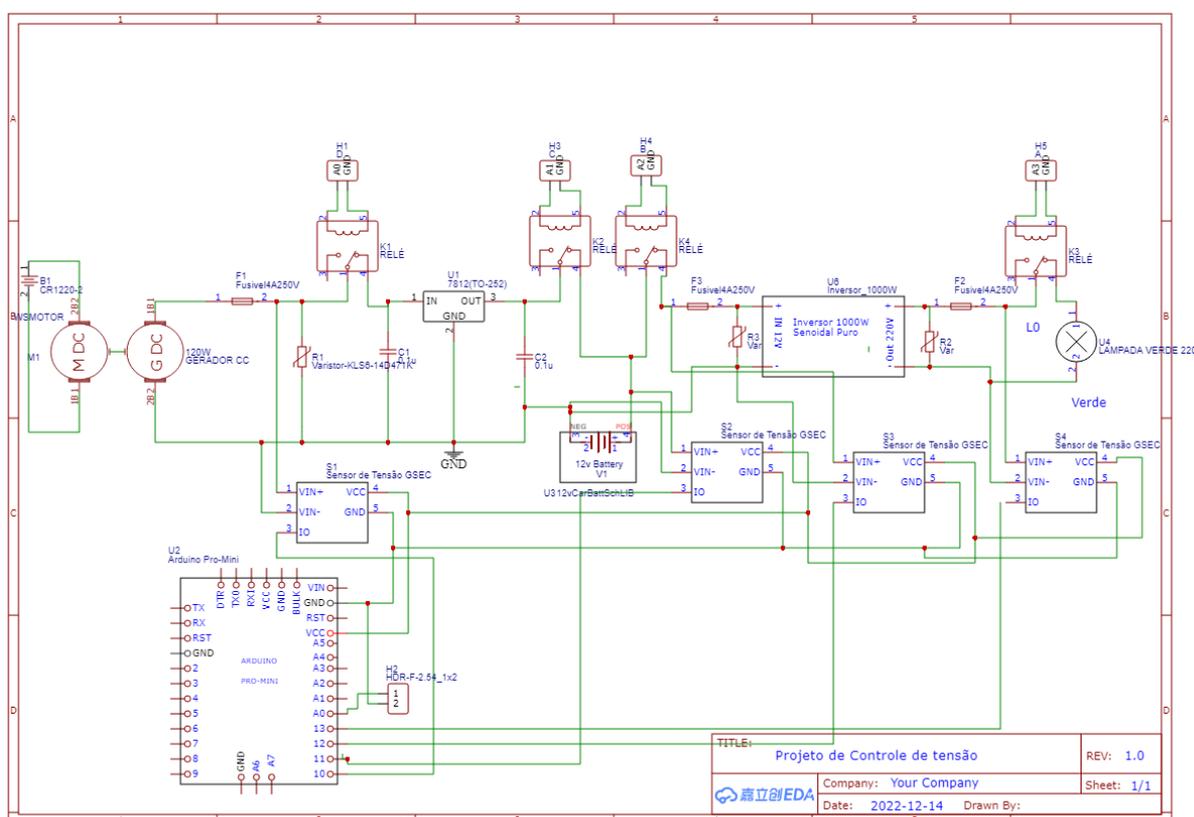


Figura 41 – Projeto do sistema completo do circuito na planta. Executado pelo autor, no EasyEAD.

6.3 Fluxograma para código fonte do sistema

O fluxograma apresentado na Figura 42 foi desenvolvido para melhor compreensão da proposta do código, onde podemos observar que após a inicialização do mesmo, uma declaração de variáveis é realizada, bem como as variações de tensão em determinados pontos do sistema são monitoradas. As siglas *TA*, *TB*, *TC*, *TD* e *TE*, representam os sensores de tensão nos pontos *A*, *B*, *C*, *D* e *E* do circuito. No ponto *A* temos a tensão na saída do gerador, no ponto *B* a tensão na entrada da bateria, no ponto *C* a tensão na saída da bateria, no ponto *D* a tensão entre a saída do regulador e a entrada do inversor e no ponto *E* a tensão na saída do inversor. As siglas *S1*, *S2*, *S3*, *S4* e *S5*, representam os relés nos pontos *A*, *B*, *C*, *D* e *E*, respectivamente. Para observar o código relativo ao fluxograma, consulte o apêndice D.

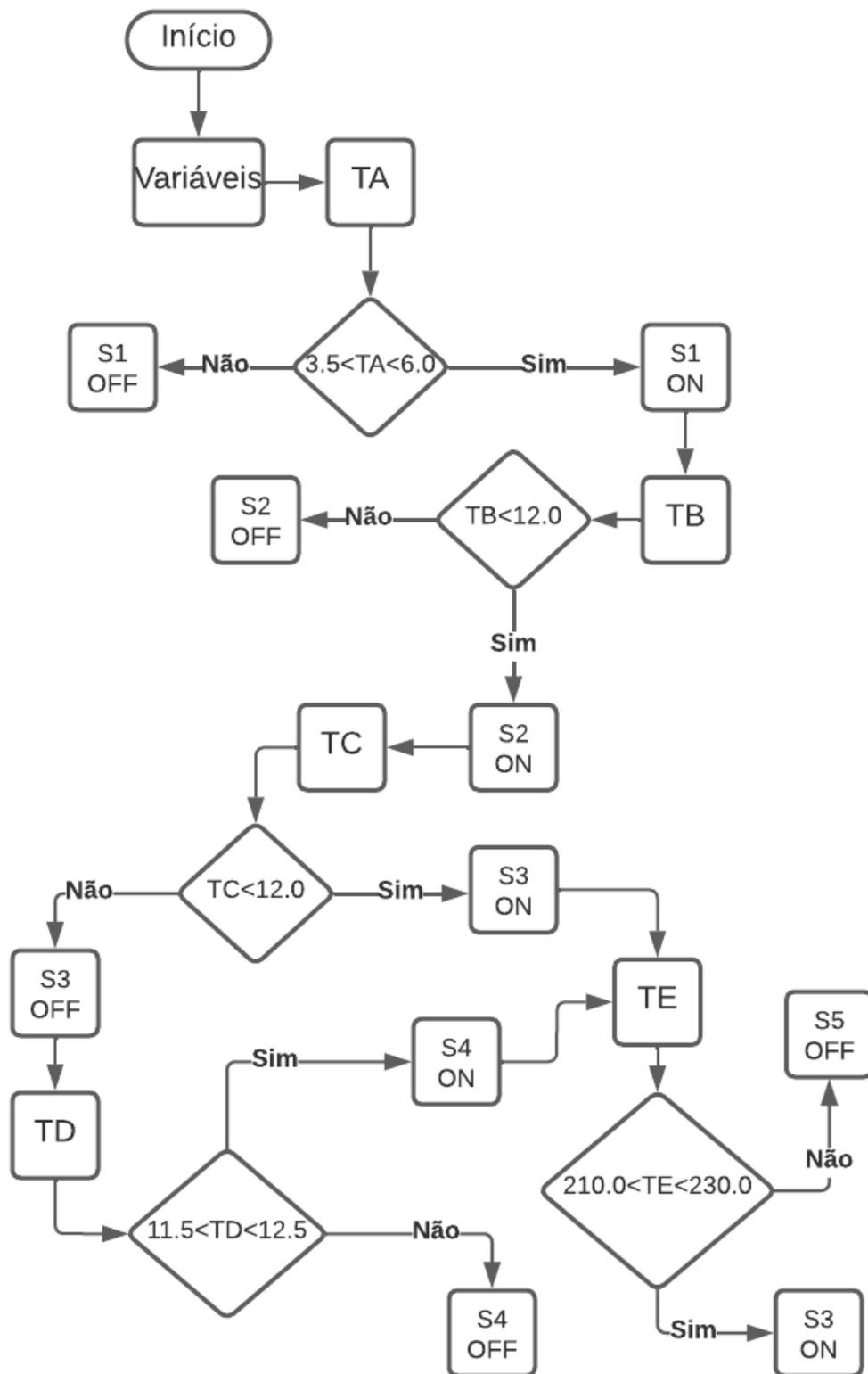


Figura 42 – Fluxograma do código. Executado pelo autor.

7 Conclusão

Na perspectiva de aumentar a eficiência do controle via programação, foi desenvolvido um sistema capaz de desviar as tensões e correntes que prejudicam o sistema de abastecimento energético de forma eletrônica sem desabastecer a carga. O sistema tem como prioridade manter a carga alimentada constantemente, tanto pela bateria como pela fonte regulada de tensão. Observa-se o comportamento dos relés de contato que desviam as tensões caso essas se tornem perigosas ao circuito, tornando um sistema livre de sobretenões e subtensões e sobrecorrentes da fonte, como também da bateria, respectivamente. Portanto tem-se a necessidade de controlar cargas, sem que o sistema eletrônico controlado por tensão seja afetado.

7.1 Trabalhos futuros

O trabalho ainda pode ser melhorado em laboratório. Pois pode ser considerado o monitoramento da potência e a inclusão de sinais de tensão da concessionária como maneiras de o sistema não ser interrompido. Portanto pode se atribuir melhorias nesse sentido. O sistema poderá caminhar para um sistema UPS.

A Diagrama Regulador de Tensão

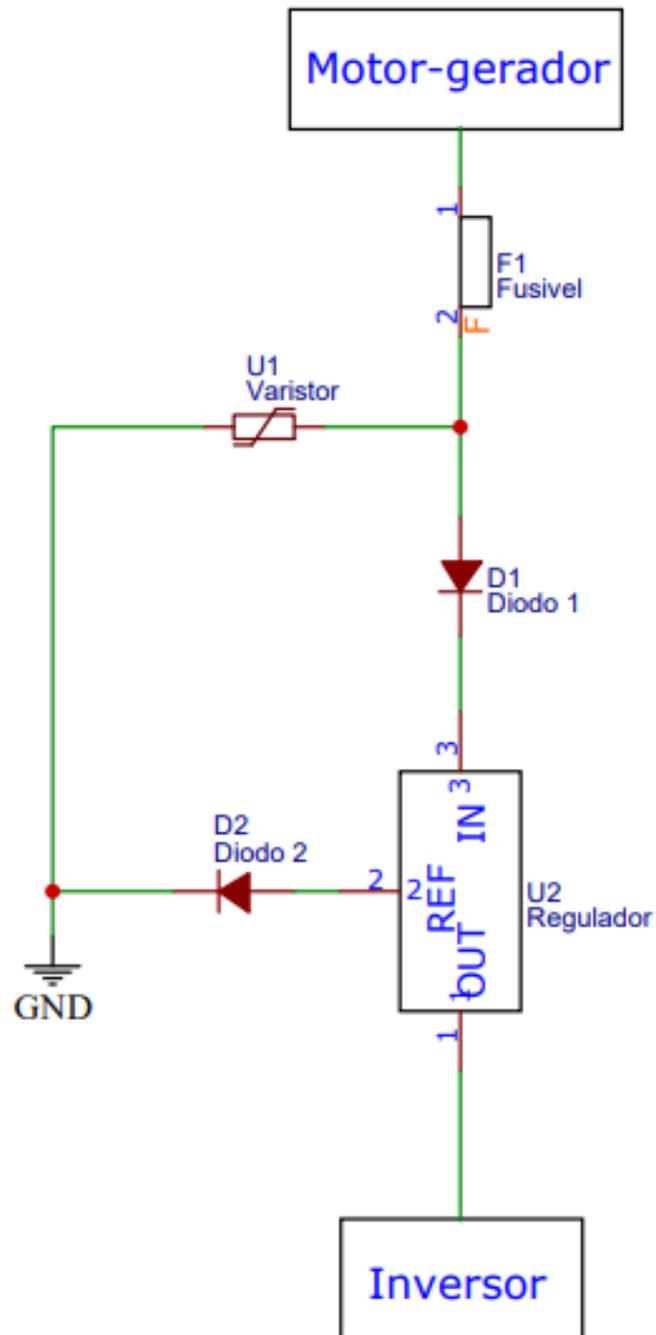


Figura 43 – Esquema regulador de tensão. Projeto executado pelo autor, no EasyEAD.

B Diagrama Comparador de Sinais

As siglas *BT1*, *BT2*, *BT3* e *BT4*, simbolizam a base dos transistores 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

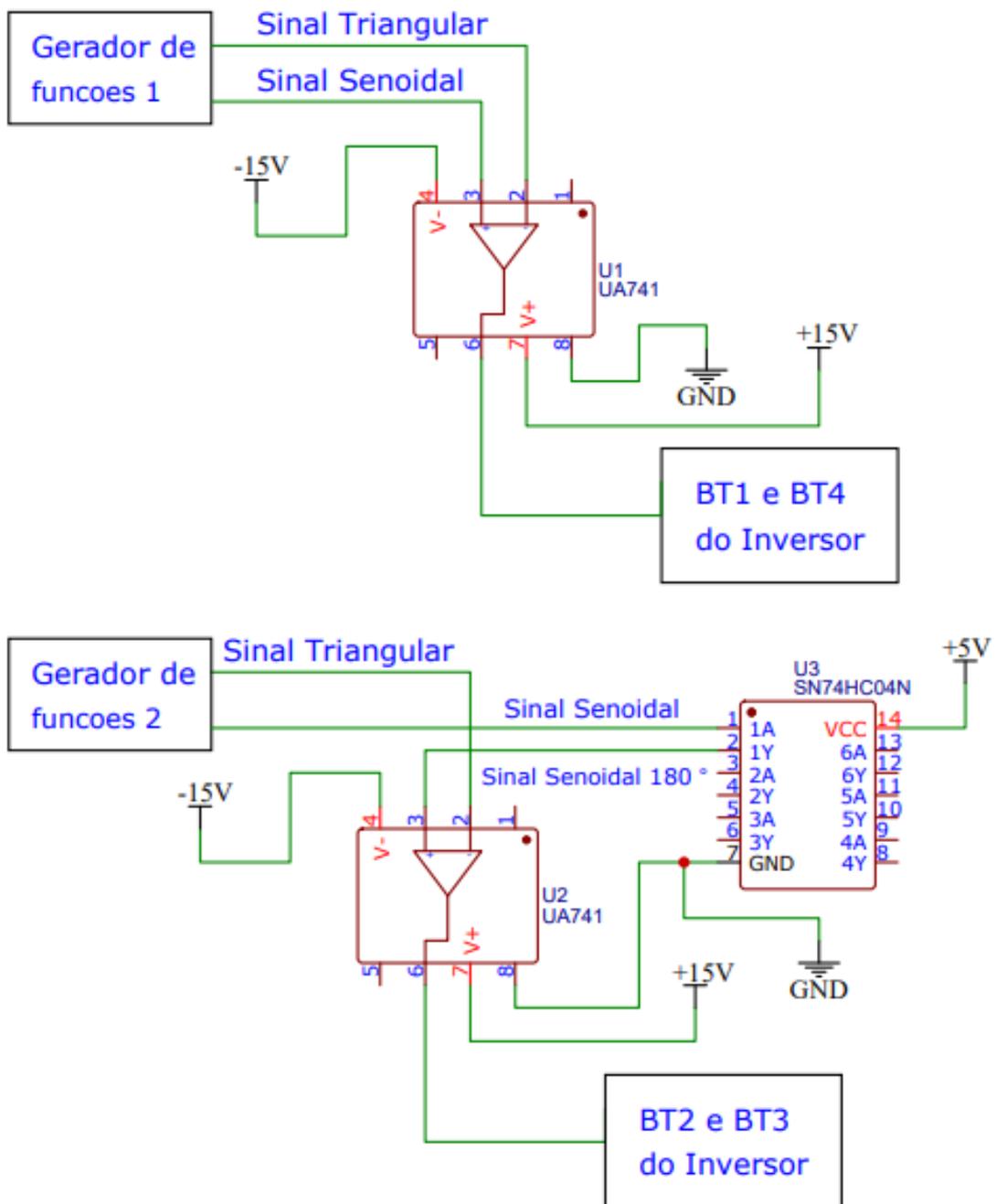


Figura 44 – Esquema Comparador de Sinais. Projeto executado pelo autor, no EasyEAD.

C Diagrama Inversor Monofásico

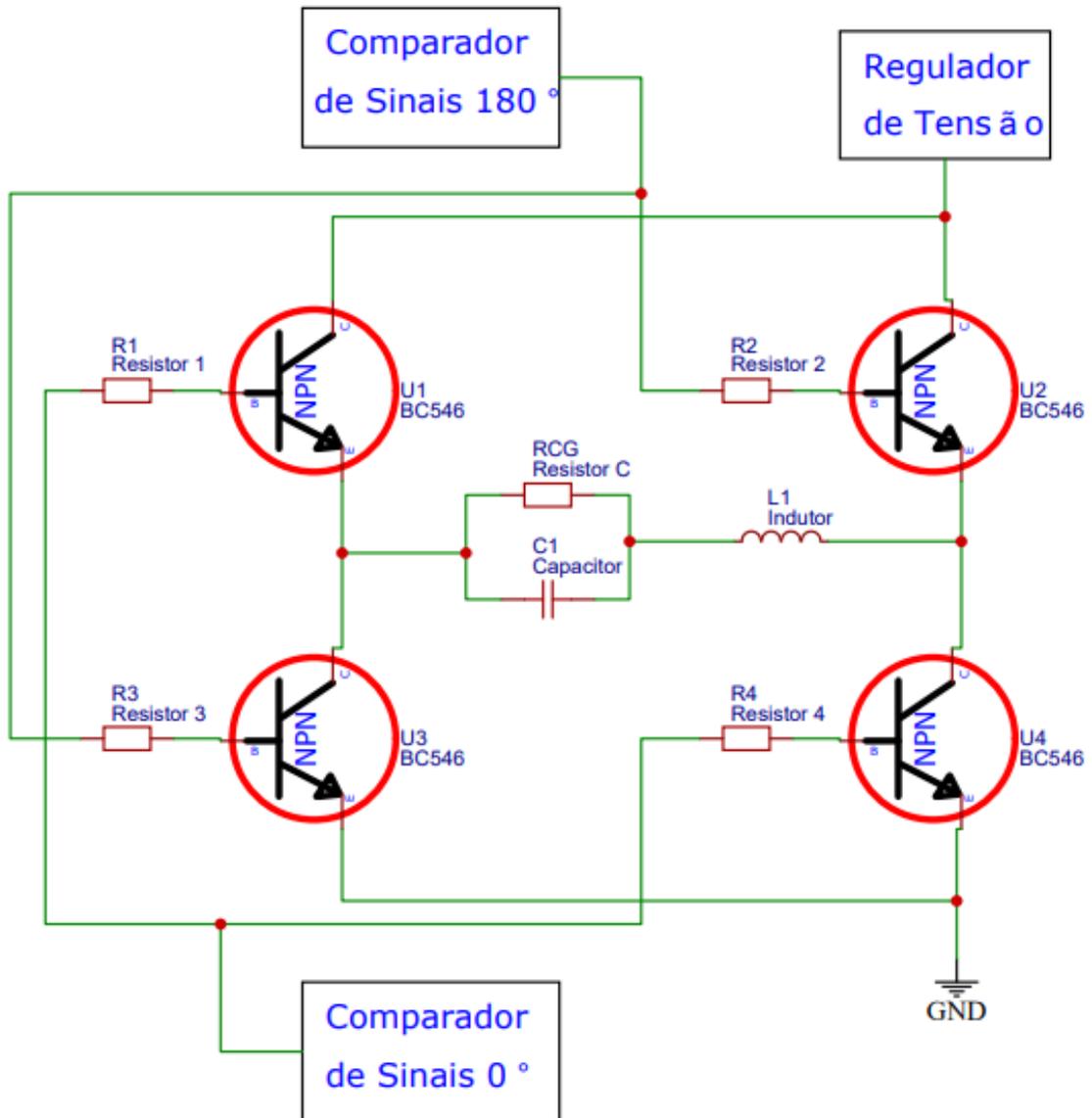


Figura 45 – Esquema inversor monofásico. Projeto executado pelo autor, no EasyEAD.

D Código Proposto para o Sistema

```
1  const int sensortensaoA = A0
2  const int sensortensaoB = A1
3  const int sensortensaoC = A2
4  const int sensortensaoD = A3
5  const int sensortensaoE = A4
6  #define releA 9
7  #define releB 10
8  #define releC 11
9  #define releD 12
10 #define releE 13
11
12 float R1 = 32600.0;
13 float R2 = 6740.0;
14 float tensao_bitsA = 0;
15 float tensao_bitsB = 0;
16 float tensao_bitsC = 0;
17 float tensao_bitsD = 0;
18 float tensao_bitsE = 0;
19 float tensao_arduinoA = 0;
20 float tensao_arduinoB = 0;
21 float tensao_arduinoC = 0;
22 float tensao_arduinoD = 0;
23 float tensao_arduinoE = 0;
24 float tensao_saidaA;
25 float tensao_saidaB;
26 float tensao_saidaC;
27 float tensao_saidaD;
28 float tensao_saidaE;
29
30 void setup(){
31     pinMode(sensortensaoA, INPUT);
32     pinMode(sensortensaoB, INPUT);
33     pinMode(sensortensaoC, INPUT);
34     pinMode(sensortensaoD, INPUT);
35     pinMode(sensortensaoE, INPUT);
36     pinMode(releA, OUTPUT);
37     pinMode(releB, OUTPUT);
38     pinMode(releC, OUTPUT);
```

```
39  pinMode(releD, OUTPUT);
40  pinMode(releE, OUTPUT);
41  Serial.begin(9600);
42  }
43  void loop(){
44  digitalWrite(releA, LOW);
45  digitalWrite(releB, LOW);
46  digitalWrite(releC, LOW);
47  digitalWrite(releD, LOW);
48  digitalWrite(releE, LOW);
49
50  tensao_bitsA = analogRead(sensortensaoA);
51  tensao_arduinoA = (5/1023)*tensao_bitsA;
52  tensao_saidaA = tensao_arduinoA/(R2/(R1+R2));
53  delay(10);
54
55  if(3.50<tensao_saidaA<6.00){
56  digitalWrite(releA, HIGH);
57  tensao_bitsB = analogRead(sensortensaoB);
58  tensao_arduinoB = (5/1023)*tensao_bitsB;
59  tensao_saidaB = tensao_arduinoB/(R2/(R1+R2));
60  delay(10);
61  if(tensao_saidaB<=12.00){
62  digitalWrite(releB, HIGH);
63  tensao_bitsC = analogRead(sensortensaoC);
64  tensao_arduinoC = (5/1023)*tensao_bitsC;
65  tensao_saidaC = tensao_arduinoC/(R2/(R1+R2));
66  delay(10);
67  if(tensao_saidaC<=12.00){
68  digitalWrite(releC, HIGH);
69  tensao_bitsE = analogRead(sensortensaoE);
70  tensao_arduinoE = (5/1023)*tensao_bitsE;
71  tensao_saidaE = tensao_arduinoE/(R2/(R1+R2));
72  delay(10);
73  if(210<=tensao_saidaE<=230.00){
74  digitalWrite(releE, HIGH);
75  }
76  else{
77  digitalWrite(releE, LOW);
78  }
79  }
80  else{
```

```
81     digitalWrite(releC, LOW);
82     tensao_bitsD = analogRead(sensortensaoD);
83     tensao_arduinoD = (5/1023)*tensao_bitsD;
84     tensao_saidaD = tensao_arduinoD/(R2/(R1+R2));
85     delay(10);
86     if(11.5<=tensao_saidaD<=12.5){
87         digitalWrite(releD, HIGH);
88         tensao_bitsE = analogRead(sensortensaoE);
89         tensao_arduinoE = (5/1023)*tensao_bitsE;
90         tensao_saidaE = tensao_arduinoE/(R2/(R1+R2));
91         delay(10);
92         if(210<=tensao_saidaE<=230.00){
93             digitalWrite(releE, HIGH);
94         }
95         else{
96             digitalWrite(releE, LOW);
97         }
98     }
99     else{
100         digitalWrite(releD, LOW);
101     }
102 }
103 }
104 else{
105     digitalWrite(releB, LOW);
106 }
107 }
108 else{
109     digitalWrite(releA, LOW);
110 }
111 }
```

Listing D.1 – Código fonte do Sistema no Arduino

Referências

- AHMED, A. *Eletrônica de Potência I*. [S.l.]: Prentice Hall, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- AHMED, N.; KHAN, Z. R. A single-phase grid-connected inverter using phase control method. In: *2021 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 183–187. Citado na página 42.
- BINACIONAL, I. *Perguntas Frequentes*. [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>>. Citado na página 15.
- BROOK, D.; MORTON, D. Digital control of a dc motor-generator set. In: *1988 International Conference on Control - CONTROL 88*. [S.l.: s.n.], 1988. p. 361–365. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 42.
- CHUNG, H. S.; HE, Y.; HUANG, M.; WU, W.; BLAABJERG, F. Control structure and modulation techniques of single-phase grid-connected inverter. In: _____. *Control and Filter Design of Single-Phase Grid-Connected Converters*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 29–41. Citado na página 40.
- ENERGIA, E. d. P. E. Ministério de Minas e. *Plano Decenal de Expansão 2029*. Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>>. Citado na página 26.
- ENERGÉTICA, E. de P. *Sistemas de Armazenamento em Baterias*. Empresa de Pesquisa Energética, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf>. Citado na página 26.
- ENERGÉTICA, E. de P. *Balço Energético Nacional - Relatório Síntese 2022*. Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Disponível em: <file:///C:/Users/Ramon%20Alencar/Desktop/TCC%20-%20docs%20e%20refs/documentos/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 15.
- JIAN-GUO, D.; LONG-FU, L.; DE-RONG, L. Simulation for svpwm inverter-smith single-phase motor speed control. In: *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 474–478. Citado na página 29.
- LEUCHTER, J.; BAUER, P.; BOJDA, P.; RERUCHA, V. Bi-directional dc-dc converters for supercapacitor based energy buffer for electrical gen-sets. In: *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–10. Citado na página 14.
- LU, Z.; WU, C.; ZHAO, L.; ZHU, W. A new three-phase inverter built by a low-frequency three-phase inverter in series with three high-frequency single-phase inverters. In: *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 3, p. 1573–1577. Citado na página 28.

- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011. Citado na página 27.
- QANBARI, T.; TOUSI, B. Single-source three-phase multilevel inverter assembled by three-phase two-level inverter and two single-phase cascaded h-bridge inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 36, n. 5, p. 5204–5212, 2021. Citado na página 21.
- RASHID, M. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. [S.l.]: Makron, 1999. Citado 6 vezes nas páginas 9, 13, 28, 29, 30 e 31.
- ROMÃO, U. G.; CARVALHO, A. D. de; JUNIOR, A. de C. *Baterias de Íon de Lítio Estado da Arte e Aplicações*. Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologia - IFSP - Campus Cubatão, 2020. v. 5. Disponível em: <https://intranet.cbt.ifsp.edu.br/qualif/volume05/1.Engenharias/Ed05_EN_07_86_106.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 26 e 27.
- TESSAROLO, P.; NUSS, A.; TABACHINI, G.; NEGRÃO, P. *O USO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS COMO UMA ENERGIA RENOVÁVEL*. [S.l.]: Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção, 2014. v. 2. Citado na página 15.
- WU, C. Y.; CHEN, C. H.; CAO, J. W.; LIU, M. T. Power control and pulsation decoupling in a single-phase grid-connected voltage-source inverter. In: *IEEE 2013 Tencon - Spring*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 475–479. Citado na página 14.
- ZHOU, Y.; HUANG, W.; HONG, F. Single-phase input variable-speed ac motor system based on an electrolytic capacitor-less single-stage boost three-phase inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 31, n. 10, p. 7043–7052, 2016. Citado na página 18.