



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RODRIGO DE SOUSA CAVALCANTE

**ESTUDO SOBRE CONTROLADORES DE CARGA PARA SISTEMAS DE
MICROGERAÇÃO HÍBRIDA EÓLICO-SOLAR**

CAMPINA GRANDE

2024

RODRIGO DE SOUSA CAVALCANTE

**ESTUDO SOBRE CONTROLADORES DE CARGA PARA SISTEMAS DE
MICROGERAÇÃO HÍBRIDA EÓLICO-SOLAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero.

CAMPINA GRANDE

2024

RODRIGO DE SOUSA CAVALCANTE

**ESTUDO SOBRE CONTROLADORES DE CARGA PARA SISTEMAS DE
MICROGERAÇÃO HÍBRIDA EÓLICO-SOLAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 07/06/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero (Orientador)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Roberto Silva de Siqueira
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

A Deus.

A minha mãe.

Aos meus irmãos.

A minha esposa.

A minha filha.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero, pela paciência, orientação e ensinamentos.

Ao Prof. Roberto Silva de Siqueira, por todo ensinamento e dedicação.

RESUMO

Os controladores de carga são essenciais para carregar e preservar a vida útil das baterias. Embora simples, podem ser complexos dependendo da potência, número de fontes e funcionalidades extras. Eles são recomendados para sistemas pequenos e de baixa potência, especialmente em locais com acesso limitado à energia elétrica. No entanto, são menos indicados para sistemas que requerem disponibilidade energética contínua, devido ao alto custo de baterias e inversores, e à necessidade de um BMS para balanceamento de carga. Inversores híbridos on-grid/off-grid e estações portáteis de energia, que combinam várias funções em uma unidade, são mais atraentes e eficientes para sistemas maiores.

Palavras-chave: controlador de carga; solar; eólico; inversor; estação portátil de energia.

ABSTRACT

Charge controllers are essential for charging and preserving the lifespan of batteries. Although simple, they can become complex depending on the power, number of sources, and additional functionalities. They are recommended for small, low-power systems, especially in locations with limited access to electricity. However, they are less suitable for systems requiring continuous energy availability due to the high cost of batteries and inverters and the need for a BMS for load balancing. Hybrid on-grid/off-grid inverters and portable power stations, which combine multiple functions in one unit, are more attractive and efficient for larger systems.

Keywords: charge controller; solar; wind; inverter; portable energy station.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo prático e ideal de uma célula solar.....	13
Figura 2 - Curva I - V da célula ideal.....	14
Figura 3 - Curva característica do modelo prático.....	14
Figura 4 - Curva típica de potência de uma turbina eólica.....	16
Figura 5 - Conversor Buck.....	17
Figura 6 - Primeira etapa de funcionamento do conversor buck.....	17
Figura 7 - Segunda etapa de funcionamento do conversor buck.....	17
Figura 8 - Conversor Boost.....	18
Figura 9 - Primeira etapa de funcionamento do conversor boost.....	19
Figura 10 - Segunda etapa de funcionamento do conversor boost.....	19
Figura 11 - Circuito dobrador de tensão.....	20
Figura 12 - Fases de carregamento de uma bateria de chumbo ácido.....	22
Figura 13 - Controlador de carga solar.....	23
Figura 14 - Controlador de carga eólico.....	24
Figura 15 - Inversor.....	25
Figura 16 - Número de ciclos em função da profundidade de descarga.....	28
Figura 17 - Vida útil da bateria em função da temperatura.....	29
Figura 18 - Balanceamento passivo com resistor fixo.....	30
Figura 19 - Balanceamento passivo com chave de comutação.....	31
Figura 20 - Balanceamento ativo de carga com capacitor.....	31
Figura 21 - Posicionamento do gerador e de componentes elétricos.....	34
Figura 22 - Esquema elétrico da turbina WG-910.....	35
Figura 23 - Circuito de controle de carregamento.....	36
Figura 24 - Circuito de controle de descarga.....	37
Figura 25 - Circuito dobrador de tensão.....	38
Figura 26 - Modelo utilizado em simulação.....	39
Figura 27 - Circuito gerador de sinal.....	40
Figura 28 - Circuito de acionamento do MOSFET.....	41
Figura 29 - Controlador de carga MPPT de 1kW.....	42
Figura 30 - Módulo ESP-WROOM-32.....	43
Figura 31 - Esquema elétrico do divisor de tensão de entrada.....	43

Figura 32 - Esquema elétrico do sensor de corrente de entrada.....	44
Figura 33 - Conversor buck assíncrono.....	45
Figura 34 - Conversor buck síncrono.....	45
Figura 35 - Esquema elétrico do circuito de sincronismo.....	46
Figura 36 - Carregador móvel.....	48
Figura 37 - Controlador de carga XH-M600.....	49
Figura 38 - Controlador de carga eólico.....	50
Figura 39 - Ponte retificadora trifásica com MOSFETs.....	51
Figura 40 - Conversor boost do controlador eólico.....	51
Figura 41 - Controlador híbrido.....	52
Figura 42 - Inversor SUN-5K-SG01 da Deye.....	53
Figura 43 - Estação portátil River 2 PRO.....	54
Figura 44 - Bluetti AC200MAX.....	55
Figura 45 - Corrente e tensão de carregamento para os três modelos.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog-to-Digital Converter
BMS	<i>Battery Management System</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	Painel fotovoltaico.....	13
2.2	Turbina eólica.....	15
2.3	Conversores CC-CC.....	16
2.3.1	<i>Conversor Buck.....</i>	16
2.3.2	<i>Conversor Boost.....</i>	18
2.4	Circuito dobrador de tensão.....	20
2.5	Controlador de carga.....	20
2.5.1	<i>Funcionalidades.....</i>	21
2.5.1.1	<i>Proteção de Sobrecarga.....</i>	21
2.5.1.2	<i>Proteção de Descarga excessiva.....</i>	21
2.5.1.3	<i>Gerenciamento de Carga.....</i>	21
2.5.2	<i>Tipos de controladores.....</i>	23
2.5.2.1	<i>Controlador de carga para geração fotovoltaica.....</i>	23
2.5.2.2	<i>Controlador de carga para geração eólica.....</i>	24
2.6	Inversor.....	24
2.6.1	<i>Tipos de inversores.....</i>	25
2.6.1.1	<i>Inversores off-grid.....</i>	25
2.6.1.2	<i>Inversor on-grid.....</i>	26
2.6.1.3	<i>Inversores híbridos on-grid/off-grid.....</i>	26
2.7	Baterias.....	26
2.7.1	<i>Banco de Baterias.....</i>	26
2.7.2	<i>Tipos de baterias.....</i>	27
2.7.2.1	<i>Baterias de chumbo ácido.....</i>	27
2.7.2.2	<i>Bateria íons de lítio.....</i>	27
2.7.3	<i>Vida útil de uma bateria.....</i>	28
2.8	Sistema de gerenciamento de bateria.....	29
2.8.1	<i>Balanceamento.....</i>	29
2.8.1.1	<i>Resistor de derivação fixo.....</i>	30
2.8.1.2	<i>Resistor de derivação com comutação.....</i>	30

2.8.1.3	Capacitor com comutação.....	31
2.9	Estação de energia portátil.....	32
3	PROJETOS.....	33
3.1	Controlador de carga e descarga para turbina eólica.....	33
3.1.1	Turbina eólica Rutland Windcharger - WG 910.....	33
3.1.1.1	Esquema do circuito elétrico da turbina WG-910.....	34
3.1.2	Projeto do controlador de carga e descarga.....	36
3.1.2.1.1	Controle de carga.....	36
3.1.2.1.2	Circuito de descarga.....	37
3.1.2.1.3	Circuito dobrador tensão.....	38
3.2	Controlador de carga solar com ciclo de trabalho constante.....	39
3.3	Controlador de carga solar MPPT.....	41
3.3.1	Desenvolvimento.....	42
3.3.1.1	Módulo ESP32.....	42
3.3.1.2	Módulo ADS1015.....	43
3.3.1.3	Conversor Buck Síncrono.....	44
3.3.1.3.1	Controle de sincronismo.....	45
3.3.1.3.2	Indutor.....	47
3.3.1.4	Algoritmo MPPT.....	47
4	SOLUÇÕES COMERCIAIS.....	48
4.1	Carregador móvel de energia solar.....	48
4.2	Controlador de carga solar.....	49
4.3	Controlador de carga eólico.....	49
4.4	Controlador de carga híbrido.....	52
4.5	Inversor híbrido on-grid.....	53
4.6	Estação de energia portátil da EcoFlow.....	54
4.7	Estação de energia portátil da Bluetti.....	55
5	CONSIDERAÇÕES.....	57
5.1	Controlador de carga e descarga para turbina eólica.....	57
5.2	Controlador de carga solar com ciclo de trabalho constante.....	57
5.3	Controlador de carga solar MPPT.....	58
5.4	Inversor híbrido on-grid/off-grid e estações portáteis de energia.....	59
6	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia elétrica tem impulsionado o desenvolvimento e a adoção de sistemas baseados em energia renováveis. Com o uso de controladores de carga, inversores e baterias é possível construir sistemas de geração de energia independentes capazes de fornecer energia de forma adequada para cada situação.

Os controladores de carga são essenciais para o carregamento das baterias, adequando a energia recebida das fontes, protegendo as baterias contra sobrecarga e prolongando sua vida útil. As baterias realizam o armazenamento da energia produzida pela fonte, permitindo o uso contínuo da energia gerada. Os inversores são responsáveis pela conversão a corrente contínua, fornecida pelas baterias, em corrente alternada possibilitando a conexão de diversos aparelhos elétricos e garantindo a compatibilidade com a rede de distribuição.

Com a evolução tecnológica, surgiram novos equipamentos que incorporaram as funcionalidades do controlador de carga. Os inversores híbridos on-grid/off-grid, por ter funções de carregamento de bateria, tornou o uso de controladores de carga dispensável. As modernas estações móveis de energia são equipamentos que reúnem as funções do controlador de carga, do inversor e da bateria, fornecendo um sistema simples e eficiente capaz de fornecer energia elétrica em lugares remotos e atividades ao ar livre.

Este trabalho explora o funcionamento dos controladores de carga, destacando suas funcionalidades e a incorporação delas por outras tecnologias.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, estão descritos os fundamentos que servem de base para o entendimento do projeto.

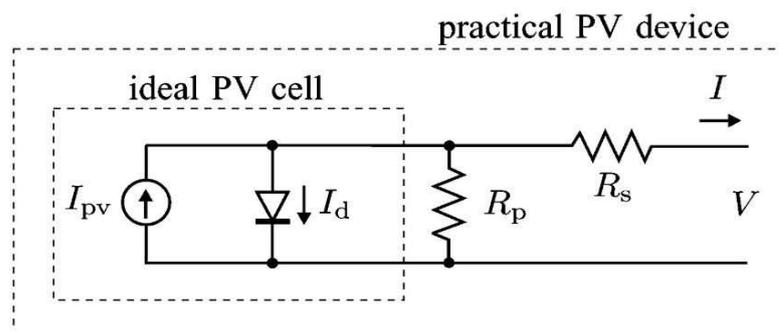
2.1 Painel fotovoltaico

A célula solar é o componente básico que forma o painel fotovoltaico e é através do efeito fotovoltaico que a célula solar converte luz do sol em energia elétrica.

Uma célula solar é em essência um diodo, portanto ele produz pouca energia elétrica. Para aumentar a geração de energia elétrica, as células solares são agrupadas em série para aumentar a tensão, formando os módulos. Esses módulos, por sua vez, são agrupados em paralelo para aumentar a corrente elétrica, formando então os painéis.

A Figura 1 ilustra o modelo ideal e prático de uma célula solar.

Figura 1 - Modelo prático e ideal de uma célula solar.



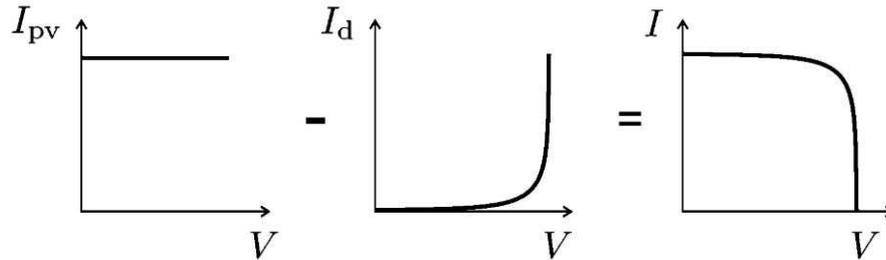
Fonte: (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009, fig. 4)

A célula ideal possui a seguinte equação

$$I = I_{pv,cell} - \underbrace{I_{0,cell} \left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right]}_{I_d} \quad (1)$$

Onde $I_{pv,cell}$ é a corrente gerada devido a luz do sol, I_d é a equação de Shockley, $I_{0,cell}$ é a corrente de saturação reversa, q é a carga do elétron, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura e a é constante de idealidade do diodo. A Figura 2 ilustra curva I - V originada da equação (1).

Figura 2 - Curva I - V da célula ideal.



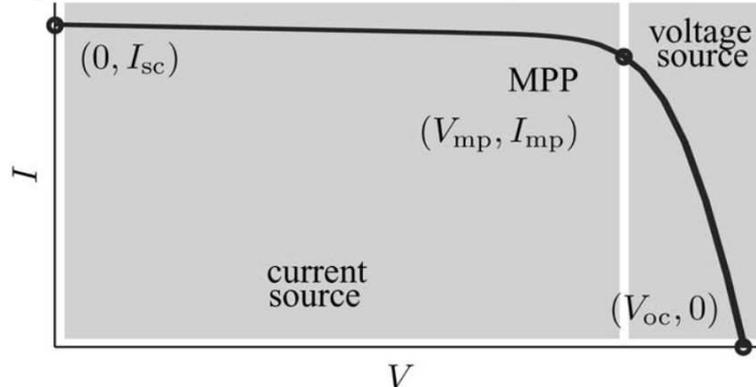
Fonte: (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009, fig. 5)

Na prática, a célula fotovoltaica possui perdas elétricas. Essas perdas são representadas através da resistência em série R_s e a resistência em paralelo R_p . Essas resistências estão ilustradas na Figura 1. Dessa forma, a equação (1) precisa ser ajustada da seguinte forma (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009)

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a} - 1\right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{2}$$

A partir da equação (2) é possível gerar uma nova curva I - V . Essa curva é ilustrada através da Figura 3.

Figura 3 - Curva característica do modelo prático.



Fonte:(VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009, fig. 6)

Na Figura 3 há três pontos destacados que são:

- a) o ponto de curto circuito ($0, I_{sc}$);
- b) o ponto de potência máxima (V_{mp}, I_{mp});
- c) o ponto de circuito aberto ($V_{oc}, 0$).

2.2 Turbina eólica

A turbina eólica é responsável por transformar parte da energia cinética dos ventos em energia elétrica. A turbina precisa ser acoplada a um gerador para que ocorra a transformação. Dessa forma, o vento movimentando as pás da turbina, convertendo energia cinética em energia mecânica e o gerador, por sua vez, converte a energia mecânica em energia elétrica.

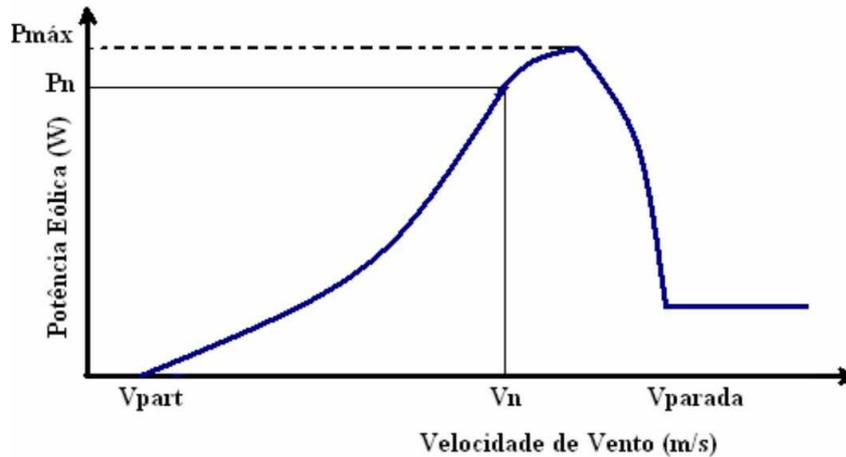
A potência disponível na turbina é dada por (NIPO, 2007)

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica do ar, A é a área de varredura das pás e v é a velocidade do vento.

A curva de potência é um gráfico que relaciona a potência da turbina com a velocidade do vento. A Figura 4 ilustra uma curva típica de potência de uma turbina eólica.

Figura 4 - Curva típica de potência de uma turbina eólica.



Fonte: (NIPO, 2007, fig. 2.4)

A velocidade mínima do vento para que ocorra a partida da turbina é dada por V_{part} , essa velocidade varia de acordo com o projeto e o tamanho da turbina. A potência nominal dada por P_n ocorre quando a velocidade do vento atinge a velocidade nominal da turbina, indicada por V_n . A potência gerada atinge seu valor máximo em $P_{máx}$ e a partir desse ponto, começa a decrescer para evitar danos ao gerador elétrico. A velocidade de parada, representada por V_{parada} , indica as velocidades em que a turbina deve permanecer parada evitando, assim, possíveis danos.

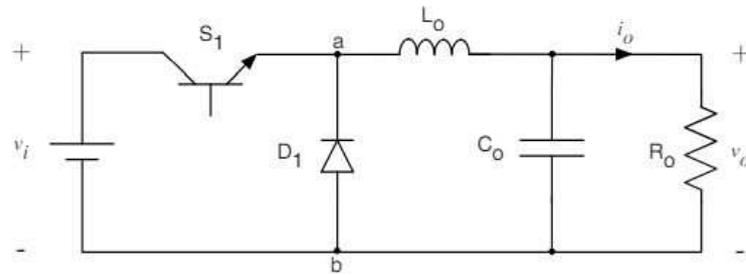
2.3 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são dispositivos capazes fornecer uma tensão constante com diferentes valores a partir de uma fonte de tensão constante.

2.3.1 Conversor Buck

O conversor buck ou conversor abaixador, é um dispositivo capaz de fornecer uma tensão constante de valor inferior ao da tensão de entrada. A Figura 5 ilustra o conversor buck.

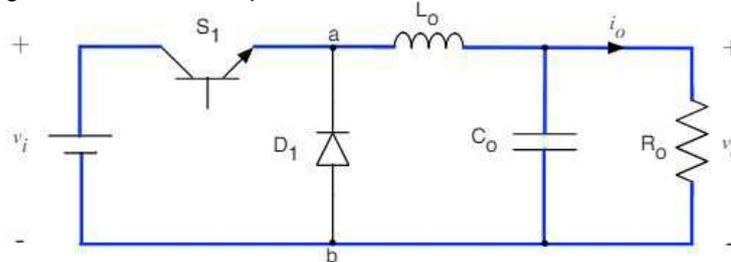
Figura 5 - Conversor Buck.



Fonte: (PETRY, [s.d.], fig. 7)

Na primeira etapa de funcionamento a chave S_1 passa a conduzir e o diodo D_1 fica inversamente polarizado, então a corrente flui através do indutor L_o , do capacitor C_o e da carga R_o , conforme ilustrado através da Figura 6.

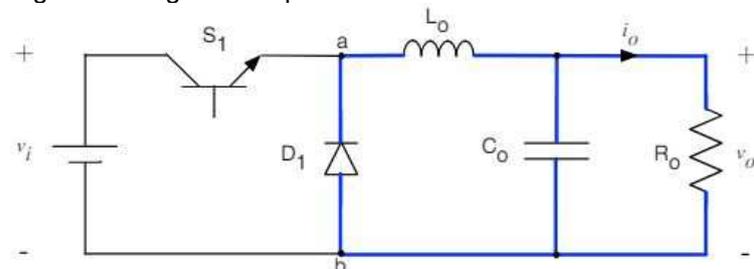
Figura 6 - Primeira etapa de funcionamento do conversor buck.



Fonte: (PETRY, [s.d.], fig. 8)

Na segunda etapa a chave S_1 para de conduzir e o diodo passa a conduzir. Nessa etapa, a carga é alimentada pelo indutor. A Figura 7 ilustra o processo.

Figura 7 - Segunda etapa de funcionamento do conversor buck.



Fonte: (PETRY, [s.d.], fig. 9)

A tensão de saída do conversor buck é dada por

$$V_o = D \cdot V_i \quad (4)$$

onde D é o ciclo de trabalho da chave S_1 .

O valor do indutor L_o e do capacitor C_o podem ser obtidos através das equações (5) e (6) respectivamente (PETRY, [s.d.]

$$L_o = \frac{V_i}{\Delta I \cdot F_s} \cdot (1 - D) \quad (5)$$

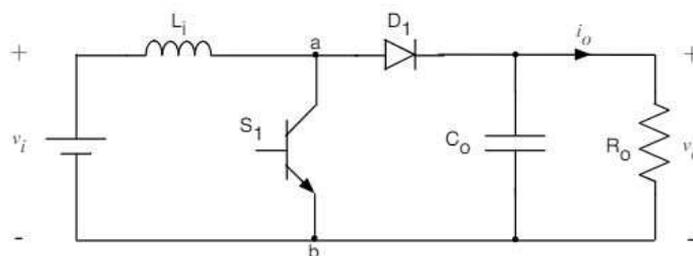
$$C_o = \frac{V_i}{31 \cdot \Delta V \cdot L_o \cdot F_s^2} \quad (6)$$

onde V_i representa a tensão de entrada, F_s representa a frequência de chaveamento da chave S_1 e ΔI e ΔV representam a ondulação da corrente no indutor e a ondulação da tensão no capacitor, respectivamente.

2.3.2 Conversor Boost

O conversor boost é um conversor elevador de tensão, ou seja, ele fornece uma tensão maior na saída em relação a tensão fornecida na entrada. A Figura 8 ilustra o conversor boost.

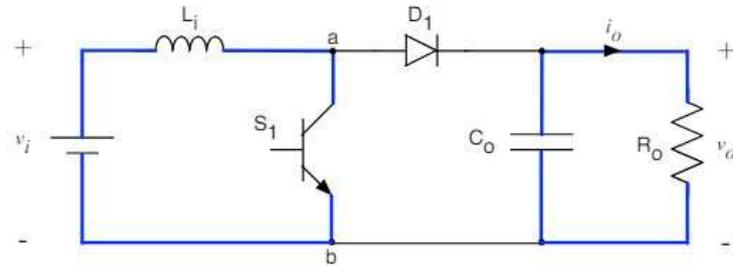
Figura 8 - Conversor Boost.



Fonte: (PETRY, [s.d.], fig. 12)

Na primeira etapa de funcionamento, a chave S_1 está ligada permitindo o carregamento do indutor L_1 . A Figura 9 ilustra o processo.

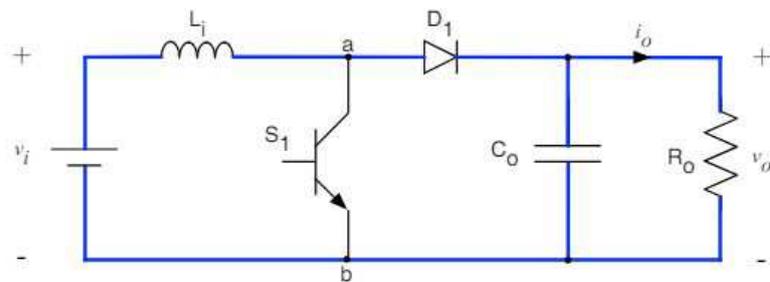
Figura 9 - Primeira etapa de funcionamento do conversor boost.



Fonte: (PETRY, [s.d.], fig. 13)

Na segunda etapa de funcionamento, a chave S_1 é desligada e a energia armazenada no indutor L_i é transferida para a carga e para o capacitor C_o . A Figura ilustra o processo.

Figura 10 - Segunda etapa de funcionamento do conversor boost.



Fonte: (PETRY, [s.d.], fig. 14)

A tensão de saída do conversor boost é dada por

$$V_o = \frac{V_i}{(1-D)} \quad (7)$$

onde D é o ciclo de trabalho da chave S_1 .

O valor do indutor L_i e do capacitor C_o podem ser obtidos através das equações (8) e (9) respectivamente (PETRY, [s.d.])

$$L_i = \frac{V_i}{\Delta I \cdot F_s} \cdot D \quad (8)$$

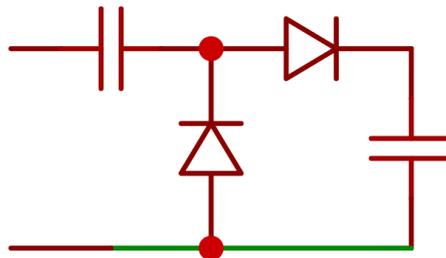
$$C_0 = \frac{I_o}{\Delta V \cdot F_s} \cdot \frac{V_0 - V_i}{V_0} \quad (9)$$

onde V_i representa a tensão de entrada, V_o a tensão de saída, I_o a corrente de saída, ΔV a ondulação da tensão no capacitor e F_s a frequência de chaveamento da chave S_1 .

2.4 Circuito dobrador de tensão

O circuito dobrador de tensão é um circuito multiplicador de tensão capaz de fornecer em sua saída uma tensão contínua com o dobro do valor da tensão de entrada. A Figura 11 ilustra o circuito dobrador de tensão.

Figura 11 - Circuito dobrador de tensão.



Fonte: Elabora pelo autor.

2.5 Controlador de carga

O controlador de carga é responsável pela carga e descarga das baterias em sistemas isolados. Ele fornece a tensão ideal para o carregamento da bateria além de monitorar as tensões para que o sistema funcione de forma adequada.

2.5.1 Funcionalidades

Os controladores de carga apresentam algumas funções que visam a segurança e a durabilidade da bateria.

2.5.1.1 Proteção de Sobrecarga

O controlador tem como função o monitoramento da tensão da bateria de modo que, no carregamento, a tensão não ultrapasse o valor especificado pelo fabricante. Em uma bateria de chumbo ácido, por exemplo, a carga completa se dá quando a tensão se encontra entre 14,4 V e 15,5 V.

2.5.1.2 Proteção de Descarga excessiva

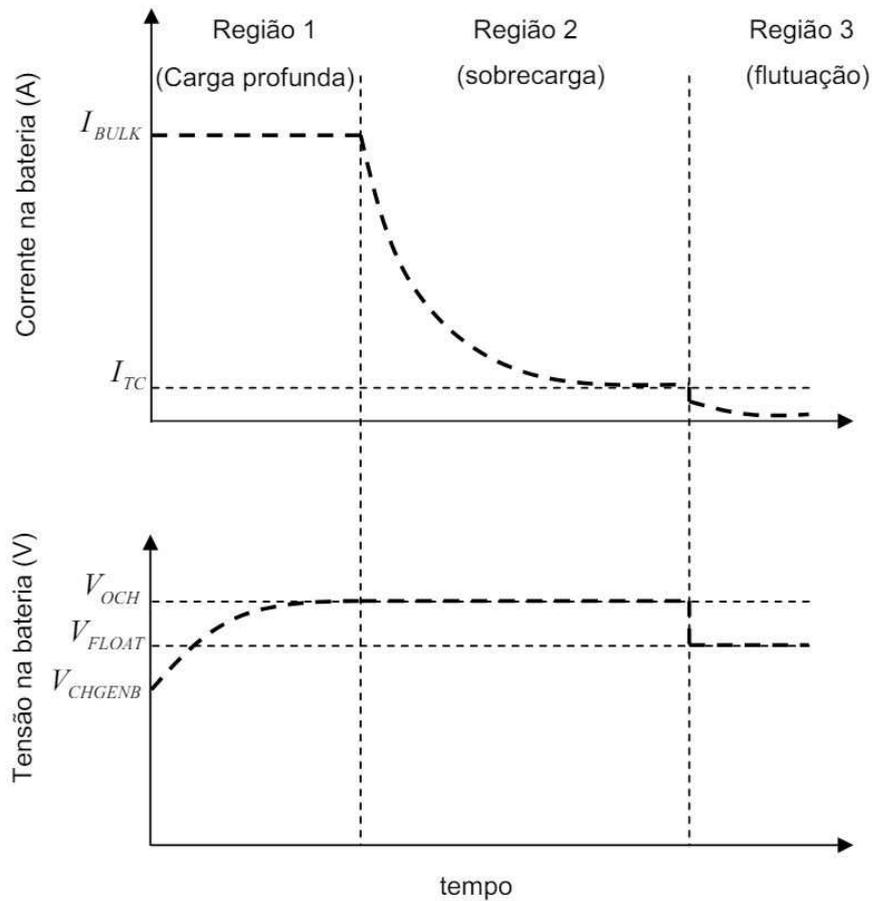
Essa função permite que o controlador de carga desligue o fornecimento de energia da bateria quando a tensão da bateria atingir um valor crítico. No caso da bateria de chumbo ácido, essa tensão fica em torno de 10,5 V.

2.5.1.3 Gerenciamento de Carga

O carregamento da bateria pode ser realizado de diversas formas. E cada modelo de controlador pode usar um ou vários métodos de carregamento de forma que a bateria seja carregada da melhor maneira preservando assim sua vida útil.

O processo de carregamento de uma bateria de chumbo ácido é dividido em três fases segundo (SEGUEL, 2009). A Figura 12 ilustra os três estágios de carregamento.

Figura 12 - Fases de carregamento de uma bateria de chumbo ácido.



Fonte: (SEGUEL, 2009, fig. 2.17)

Na região de carga profunda, o controlador aplica uma corrente constante I_{BULK} na bateria. Então, inicialmente a bateria apresenta uma tensão mínima V_{CHGENB} e é carregada até a tensão máxima de sobrecarga V_{OCH} .

A segunda região, a região de sobrecarga, o controlador mantém a tensão máxima de sobrecarga constante V_{OCH} , até que a corrente atinja o valor de corrente I_{TC} que corresponde ao valor de 1% da capacidade da bateria.

Já na região de flutuação, a tensão aplicada na bateria é reduzida para a tensão de flutuação V_{FLOAT} , para compensar o efeito da autodescarga da bateria, gerando assim uma pequena corrente.

2.5.2 Tipos de controladores

Os controladores possuem funções que variam de acordo com a sua finalidade.

2.5.2.1 Controlador de carga para geração fotovoltaica

Os controladores de carga para geração fotovoltaica são os mais comuns de serem encontrados. Possuem, geralmente, uma entrada para painel fotovoltaico, uma saída para bateria e uma saída para carga. A Figura 13 ilustra um controlador de carga para geração fotovoltaica.

Figura 13 - Controlador de carga solar.



Fonte: ("LS-B Series(10~30A) PWM Charge Controller", [s.d.]

Controladores mais simples permitem apenas a conexão e desconexão da bateria e da placa, utilizando relés ou transistores para isso. Há outros controladores que utilizam a modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*) para controlar a tensão fornecida à bateria. Existem, também, alguns mais modernos, que utilizam algoritmos para rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*) para extrair a máxima potência da fonte.

2.5.2.2 Controlador de carga para geração eólica

Os controladores de carga para geração eólica são equipamentos voltados para o controle da tensão e da corrente elétrica gerada através dos geradores elétricos presentes nas turbinas eólicas. Possuem entradas monofásicas ou trifásicas, dependendo da turbina utilizada, além de possuírem uma saída para bateria e uma saída para a carga. A Figura 14 ilustra um controlador de carga para geração eólica.

Figura 14 - Controlador de carga eólico.



Fonte: ("Rutland HRSi Regulator – ABS Alaskan, Inc.", [s.d.]

Os controladores para turbinas eólicas podem vir com circuitos responsáveis pela proteção da turbina ou com elementos resistivos que possuem a mesma função.

2.6 Inversor

Os inversores são equipamentos que convertem a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Logo, esses equipamentos são utilizados em sistemas fotovoltaicos ou em sistemas com baterias para fornecer a tensão adequada para as cargas.

O inversor utiliza uma fonte de tensão CC e através do chaveamento de transistores, gera um sinal senoidal na saída. A Figura 15 ilustra um inversor.

Figura 15 - Inversor.



Fonte: ("IPower-Plus Series(220/230VAC) 350~5000W Pure Sine Wave Inverter", 2022)

2.6.1 Tipos de inversores

Os inversores são classificados de acordo com sua aplicação.

2.6.1.1 Inversores off-grid

Os inversores *off-grid* são utilizados em sistemas isolados, comumente utilizado em ambientes onde há limitação no acesso à rede elétrica convencional. Os inversores *off-grid* mais simples, normalmente são utilizados juntos à ao controlador de carga e banco de baterias.

2.6.1.2 Inversor on-grid

Os inversores *on-grid* são utilizados em sistemas interligados à rede elétrica convencional, garantindo uma segurança no caso de falha no fornecimento de energia elétrica pela concessionária.

Esses inversores possuem entradas para a rede elétrica e painéis fotovoltaicos. Com esse dispositivo é possível injetar energia elétrica excedente produzida, na rede convencional, permitindo a geração de créditos de energia.

2.6.1.3 Inversores híbridos on-grid/off-grid

Os inversores híbridos on-grid/off-grid são equipamentos que reúnem características dos inversores on-grid e off-grid. Por ser um equipamento mais sofisticado, ele integra funções do controlador de carga para fornecer a tensão adequada à bateria.

2.7 Baterias

As baterias são geralmente utilizadas em sistemas *off-grid* para o armazenamento de energia elétrica devido a característica intermitente da radiação solar e dos ventos.

2.7.1 Banco de Baterias

O banco de baterias é formado por conjunto de baterias para um maior armazenamento de energia elétrica e também para fornecer tensões e correntes

adequadas para determinada situação. As baterias podem ser agrupadas em série ou paralelo de forma que o banco aumente simultaneamente a tensão e a corrente elétrica.

2.7.2 Tipos de baterias

Há vários tipos de baterias elétricas utilizadas em sistemas de armazenamento. As baterias de chumbo ácido são as mais comuns mas com o avanço da tecnologia estão sendo substituídas por baterias de íons de lítio.

2.7.2.1 Baterias de chumbo ácido

As baterias de chumbo ácido possuem o cátodo formado por dióxido de chumbo (PbO_2) e o ânodo formado por chumbo metálico (Pb). Ambos os eletrodos estão mergulhados em uma solução ácida que pode ser líquida ou gel.

As baterias de chumbo ácido com eletrólito líquido são mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos *off-grid* devido ao seu custo reduzido. A bateria estacionária foi desenvolvida para sistemas que necessitam do armazenamento de energia por um longo período de tempo e apesar da semelhança com baterias automotivas, há características construtivas em suas células que se faz necessário a recomendação de baterias estacionárias em sistemas fotovoltaicos. (VILLALVA, 2012)

2.7.2.2 Bateria íons de lítio

As baterias de íons de lítio são projetadas também na forma de células. A associação das células é que determina a tensão e a capacidade de armazenamento de energia.

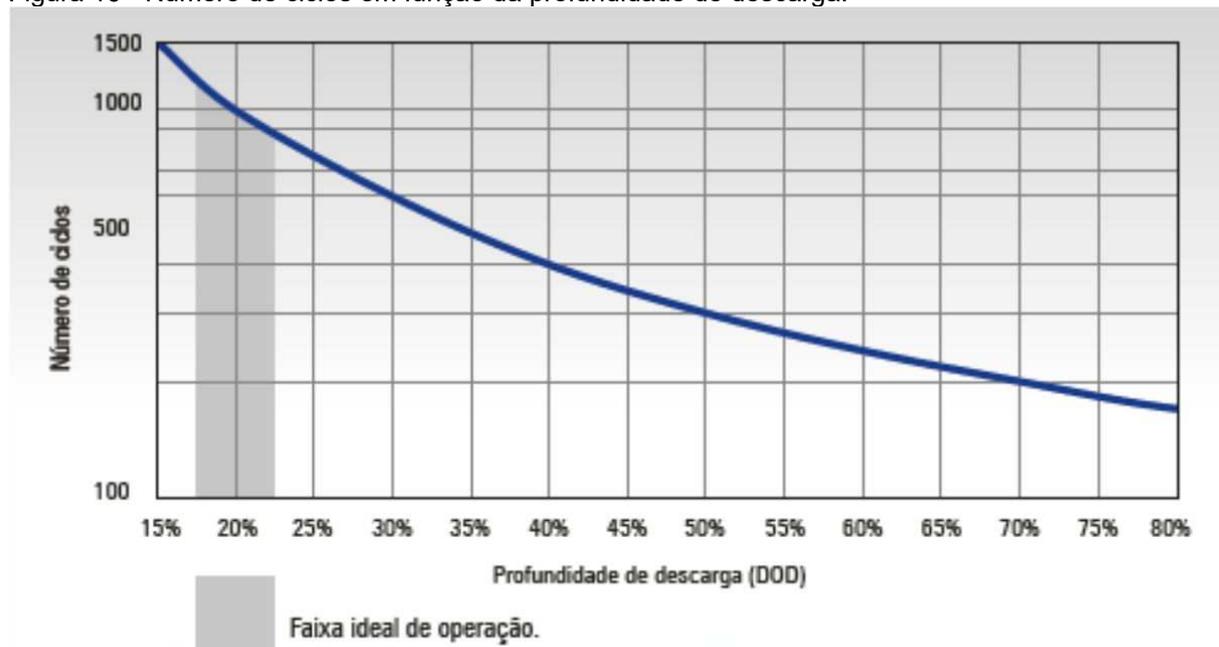
O ânodo normalmente é formado por grafite ou outro material de carbono pois permite uma corrente elétrica maior e mantém a temperatura controlada durante o processo de carga e descarga da bateria. O cátodo é formado por óxidos de metais ou compostos de fosfato. Os materiais mais comuns são o óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2), o óxido de lítio-manganês (LiMnO_4), o óxido de lítio níquel-manganês-cobalto (LiNiMnCoO_2), o lítio fosfato de ferro (LiFePO_4) e o óxido de lítio cobalto alumínio (LiNiCoAlO_2) (NETO, 2023).

2.7.3 Vida útil de uma bateria

A vida útil de uma bateria é determinada pela quantidade de ciclos de carga e descarga. A cada ciclo de carga e descarga, o material das células da bateria é transferido para os terminais. Quando o material não consegue se juntar ao terminal novamente a vida útil da bateria diminui. (VILLALVA, 2012)

O número máximo de ciclos depende da profundidade de descarga realizada, ou seja, o quanto essa bateria foi descarregada em relação à carga máxima da bateria.

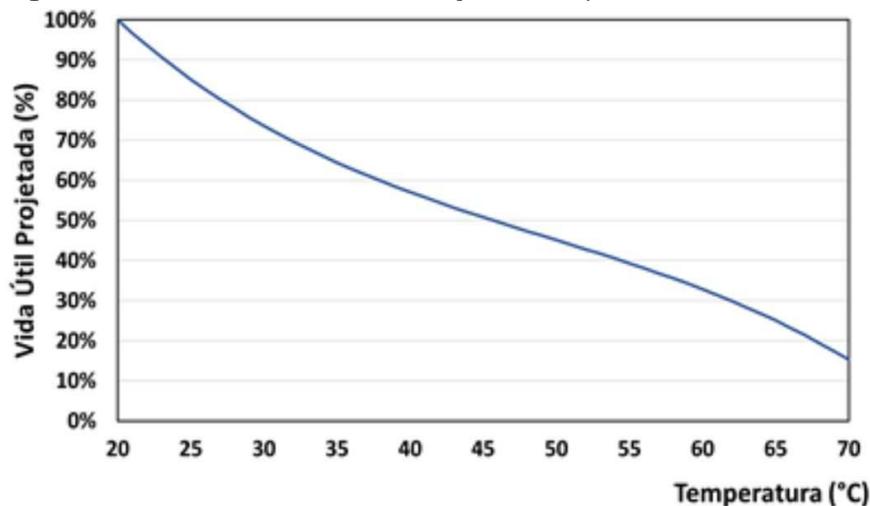
Figura 16 - Número de ciclos em função da profundidade de descarga.



Fonte: ("Manual-tecnico-Moura-Solar-MS-V1.4-POT.pdf", [s.d.], fig. 09)

A temperatura de operação e de armazenamento também contribuem para a redução da vida útil da bateria. A Figura 17 ilustra tempo de vida de uma bateria de chumbo ácido em função da temperatura.

Figura 17 - Vida útil da bateria em função da temperatura.



Fonte: ("Manual-tecnico-Moura-Solar-MS-V1.4-POT.pdf", [s.d.], fig. 04)

2.8 Sistema de gerenciamento de bateria

O sistema de gerenciamento de bateria (BMS, do inglês *Battery Management System*) é utilizado para fornecer a segurança na operação de baterias, evitando acidentes ou redução da vida útil da bateria.

Esse sistema permite monitorar cada célula ou pacote de baterias realizando o controle de carga e descarga, monitorando a temperatura e, principalmente, realizando o balanceamento de carga das baterias.

2.8.1 Balanceamento

O balanceamento é uma função do BMS que mantém o nível de tensão igual para todos os elementos, sejam células ou pacote de baterias. O processo de

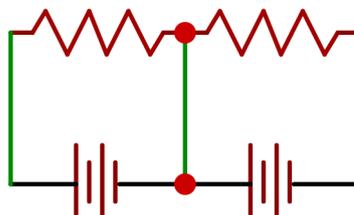
carga e descarga não é uniforme para todos os elementos, dessa forma, o balanceamento é essencial para a segurança e manutenção da vida útil da bateria.

Há diversas formas de realizar o balanceamento de carga. Os processos podem ser de forma passiva eliminando o excesso de carga da célula através de uma resistência ou de forma ativa transferindo a carga da célula com excesso para outra com falta (NETO, 2023).

2.8.1.1 Resistor de derivação fixo

Esse modo é um tipo de balanceamento passivo que consiste no uso de resistores em paralelo com cada célula de forma a eliminar o excesso de carga na bateria. É umas das formas mais simples e baratas de implementação. A Figura 18 ilustra um circuito de balanceamento com resistor fixo.

Figura 18 - Balanceamento passivo com resistor fixo.

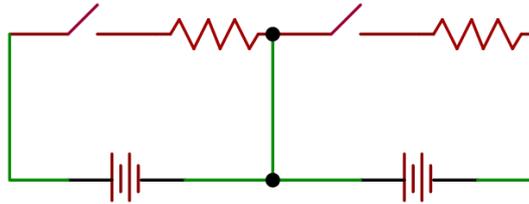


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.8.1.2 Resistor de derivação com comutação

Esse modo de balanceamento passivo utiliza chaves associadas a resistores em paralelo com a bateria. O controle das chaves deve ser realizado por um microcontrolador, permitindo um gerenciamento melhor da descarga. A Figura 19 ilustra o circuito de balanceamento com chaves.

Figura 19 - Balanceamento passivo com chave de comutação.

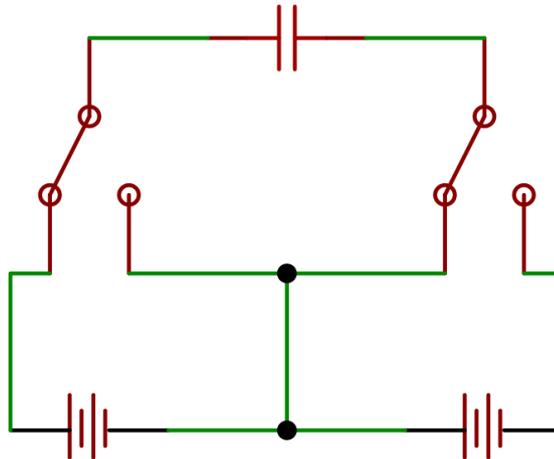


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.8.1.3 Capacitor com comutação

O troca da resistência por capacitores é uma das formas de melhor aproveitamento da energia. Portanto, os circuitos que utilizam capacitores são considerados como circuitos de balanceamento ativo. Nesse modo, o capacitor é colocado em paralelo com duas células para que o controlador habilite quando necessário a chave para transferência de energia entre as células. A Figura 20 ilustra o circuito para balanceamento ativo de carga.

Figura 20 - Balanceamento ativo de carga com capacitor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.9 Estação de energia portátil

A estação de energia portátil é um dispositivo compacto capaz de fornecer energia elétrica em situações onde não há rede elétrica disponível ou onde o acesso é limitado. Uma estação é composta por controlador de carga, inversor, *BMS* e baterias.

Esse tipo de equipamento é muito utilizado em *motor-home*, devido a grande quantidade de equipamentos elétricos presente. Para isso, a estação pode ter conexão para painéis fotovoltaicos e rede elétrica convencional, além de possuir diversas saídas capazes de fornecer energia elétrica para os equipamentos.

3 PROJETOS

A seguir são apresentados alguns projetos encontrados na internet que são usados como referência.

3.1 Controlador de carga e descarga para turbina eólica

O controlador de carga desenvolvido por (NIPO, 2007) foi projetado para aplicações com turbinas eólicas de pequeno porte. Para isso ele modificou uma turbina eólica Rutland Windcharger – WG 910, fabricada pela Marlec Engineering Co Ltd., fazendo com que a turbina conseguisse carregar a bateria mesmo com ventos de baixa velocidade.

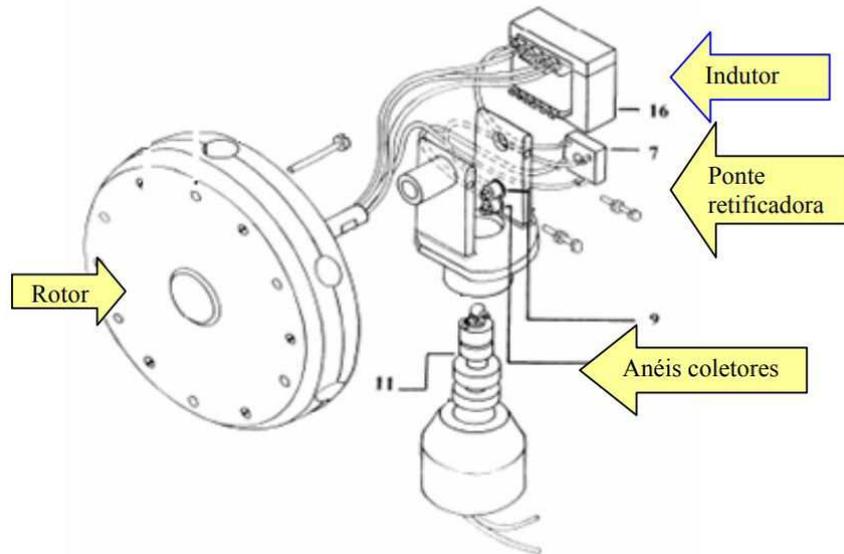
3.1.1 Turbina eólica Rutland Windcharger - WG 910

A Rutland Windcharger – WG 910 é uma turbina monofásica de pequeno porte composta por um rotor aerodinâmico, um gerador síncrono, nacele e leme de orientação. No interior da nacele estão abrigados alguns componentes como:

- a) ponte retificadora de onda completa, para transformar a corrente alternada em corrente contínua;
- b) indutor, para controle da corrente elétrica, limitando a ondulação da onda e protegendo o gerador;
- c) conjunto de anéis coletores e escovas, para transferência da energia elétrica para o meio externo.

A Figura 21 ilustra o posicionamento do gerador e dos componentes.

Figura 21 - Posicionamento do gerador e de componentes elétricos.

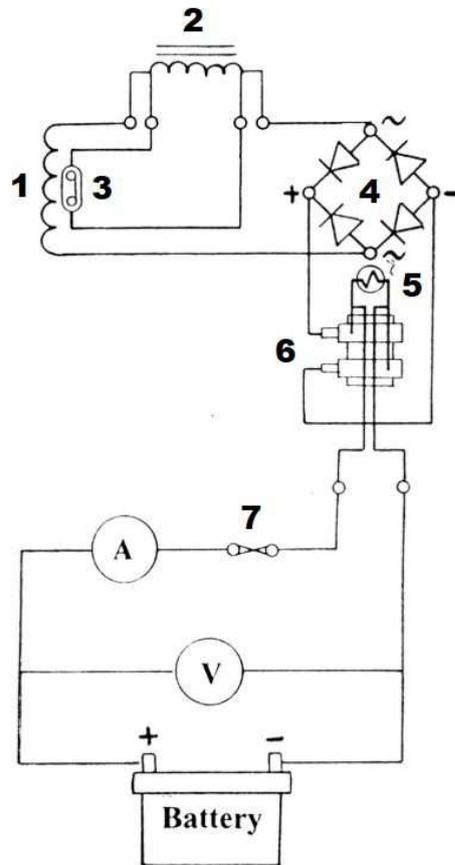


Fonte: (NIPO, 2007, fig. 2.12)

3.1.1.1 Esquema do circuito elétrico da turbina WG-910

O circuito elétrico da turbina eólica é ilustrado através da Figura 22. A bobina do gerador é representado pelo indutor (1) e está ligada em série ao indutor limitador de ondulação (2). Em paralelo com o indutor limitador de ondulação está o termostato normalmente fechado (3). O retificador de onda completa (4) recebe o sinal da bobina e encaminha para o diodo de proteção contra inversão de polaridade (5) e em seguida para os anéis coletores (6). O componente ilustrado através de (7) é um fusível de proteção.

Figura 22 - Esquema elétrico da turbina WG-910.



Fonte: Adaptado de ("910-Fault-Finding-Manual.pdf", [s.d.]

Em condições normais de operação, a corrente elétrica gerada pela bobina do gerador (1) passa diretamente pelo termostato normalmente fechado (3). Em seguida, a ponte retificadora (4) transforma o sinal CA em CC e envia para os anéis coletores (6) através do diodo de proteção (5).

Já em situações de superaquecimento da bobina do gerador, o termostato interrompe a corrente elétrica que passava por ele. Toda corrente passará obrigatoriamente pelo indutor (2), diminuindo a corrente fornecida a carga até que a temperatura do gerador diminua e o termostato volte a fechar o contato.

3.1.2 Projeto do controlador de carga e descarga

A proposta do controlador é que ele tenha um circuito dobrador de tensão para um melhor aproveitamento da energia gerada pela turbina eólica em baixas rotações. Além disso, o controlador proposto inclui um circuito de controle de carga e outro para controle de descarga.

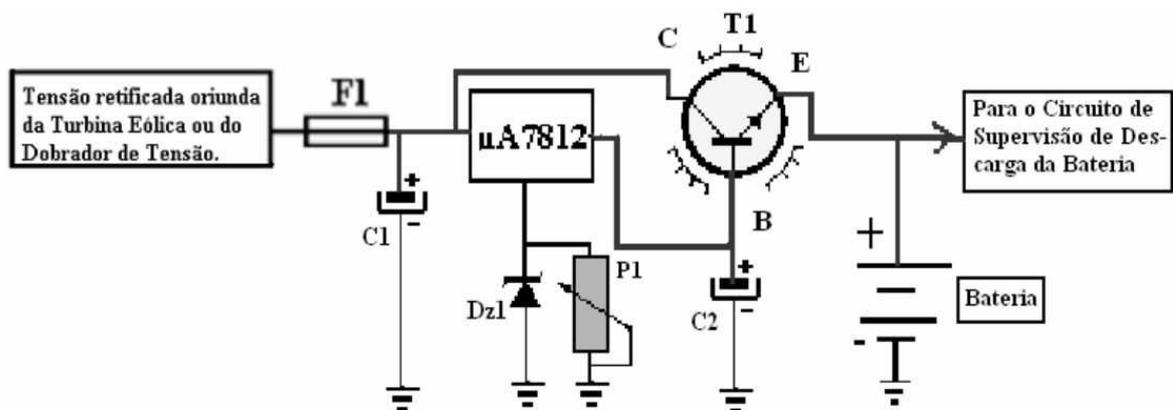
3.1.2.1.1 Controle de carga

O controle de carga opera fornecendo uma tensão de 13,8 V para a bateria. Para isso, foram utilizados os seguintes componentes:

- regulador de tensão $\mu A7812$;
- fusível de 10 A;
- diodo zener;
- trim-pot;
- transistor de potência;

A Figura 23 ilustra o circuito de carregamento da bateria.

Figura 23 - Circuito de controle de carregamento.



Fonte: (NIPO, 2007, fig. 3.7)

O controlador de carga é conectado à ponte retificadora da turbina e ao circuito dobrador de tensão. A corrente elétrica entra no circuito de carregamento através do fusível $F1$ de 10 A, utilizado para proteção. O capacitor $C1$ é utilizado como filtro capacitivo para diminuir a ondulação da corrente. O diodo zener $Dz1$ e o trimpot $P1$ são responsáveis pelo ajuste da tensão de saída para carregamento da bateria de 13,8 V.

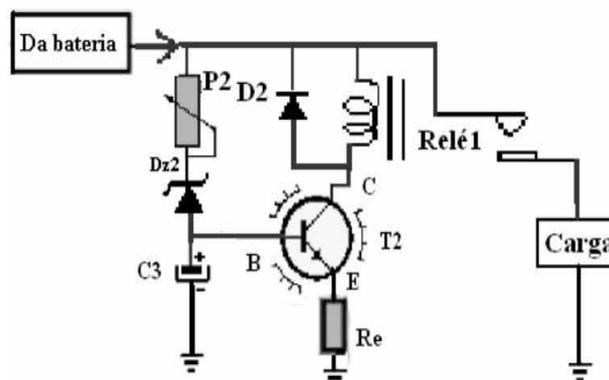
3.1.2.1.2 Circuito de descarga

O circuito de controle de descarga atua impedindo uma descarga profunda da bateria. Dessa forma, quando a bateria atingir a tensão de 11,8 V, a carga é desligada. Para isso, o circuito de descarga utilizou os seguintes componentes:

- transistor de potência;
- relé normalmente aberto (NA);
- trim-pot;
- diodo zener.

A Figura 24 ilustra o esquema elétrico do circuito de controle de descarga.

Figura 24 - Circuito de controle de descarga.



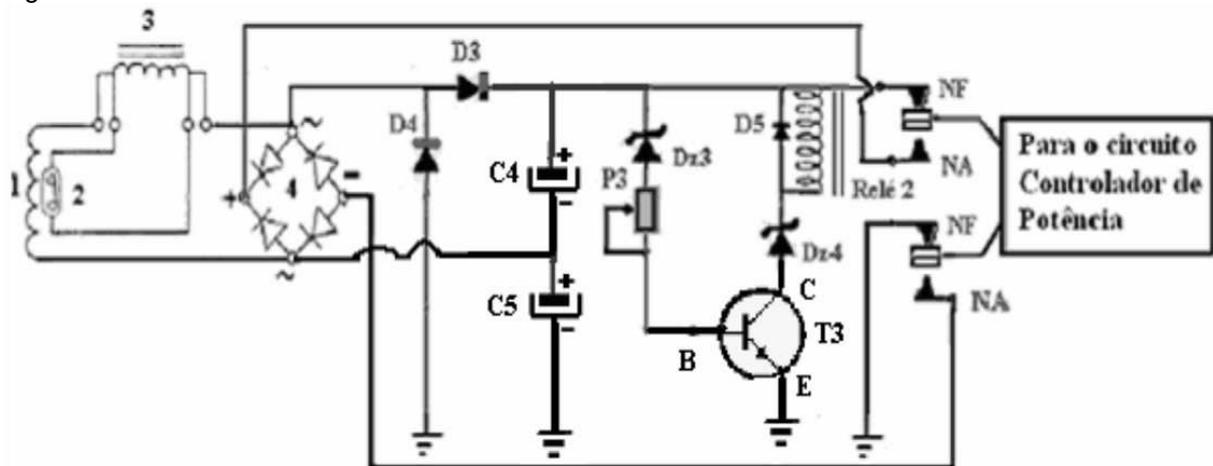
Fonte: (NIPO, 2007, fig. 3.5)

A bateria é conectada à entrada do circuito de descarga. Nesse circuito, o *Relé1* fecha contato somente quando a tensão da bateria for igual ou superior a 12,6 V. Quando a tensão da bateria diminui para 11,8 V, o *Relé1* abre contato para evitar a descarga da bateria. A tensão de descarga da bateria é ajustada através do diodo zener *Dz2* e do trimpot *P2*.

3.1.2.1.3 Circuito dobrador tensão

O circuito dobrador de tensão é utilizado para fornecer uma tensão adequada para o carregamento das baterias, aproveitando a energia gerada pelos ventos de baixa velocidade. A Figura 25 ilustra o esquema elétrico do circuito dobrador de tensão.

Figura 25 - Circuito dobrador de tensão.



Fonte: (NIPO, 2007, fig. 3.9)

O circuito é acoplado antes da ponte retificadora da turbina eólica e utiliza os capacitores *C4* e *C5* em série junto aos diodos *D3* e *D4* que permitem o carregamento dos capacitores a cada meio ciclo de onda.

A turbina eólica fornece uma tensão adequada, de 16,5 V, para carregamento da bateria a uma velocidade de rotação maior que 450 RPM, o que corresponde a uma velocidade de vento maior que 7 m/s. Com o circuito dobrador de tensão é possível carregar a bateria na tensão adequada, quando a velocidade

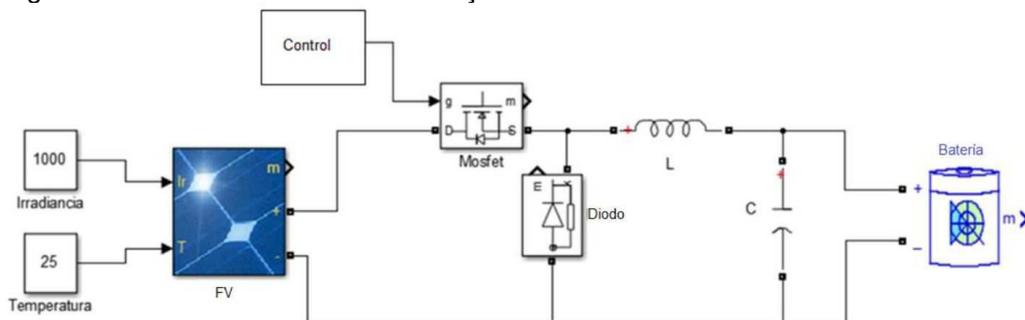
de rotação do rotor é maior que 180 RPM, o que corresponde a uma velocidade do vento maior que 3 m/s, ou seja, com uma tensão produzida pela turbina de apenas 6,5 V (NIPO, 2007).

O chaveamento do *Relé2* ocorrerá quando a tensão fornecida pela turbina for maior ou igual a 11,68 V. Dessa forma, o circuito dobrador de tensão é desligado, deixando apenas o circuito de carregamento operando.

3.2 Controlador de carga solar com ciclo de trabalho constante

O controlador de carga para geração fotovoltaica proposto por (FIRMAN et al., 2022) utiliza um conversor buck com ciclo de trabalho constante. A proposta é de que o controlador seja eficiente e simples, evitando a complexidade de controladores de carga PWM e MPPT. A Figura 26 ilustra o modelo utilizado em simulação.

Figura 26 - Modelo utilizado em simulação.



Fonte: (FIRMAN et al., 2022, fig. 2)

Para o projeto, foi considerado um painel fotovoltaico com tensão de circuito aberto V_{CA} de 21 V e uma bateria de íons de lítio com tensão nominal de 11,1 V, composta por três células conectadas em série. A frequência de chaveamento foi definida em 20 kHz.

O cálculo para a obtenção do valor do ciclo de trabalho é realizado utilizando a tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico e a tensão máxima suportada pela bateria, que no caso é de 12,6 V. Dessa forma,

$$D = \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = \frac{12,6}{21} = 0,6 \quad (10)$$

O cálculo do indutor é dado por (FIRMAN et al., 2022)

$$L = \frac{V_{saída}(1-D)}{\Delta I_L f} = 270 \mu H \quad (11)$$

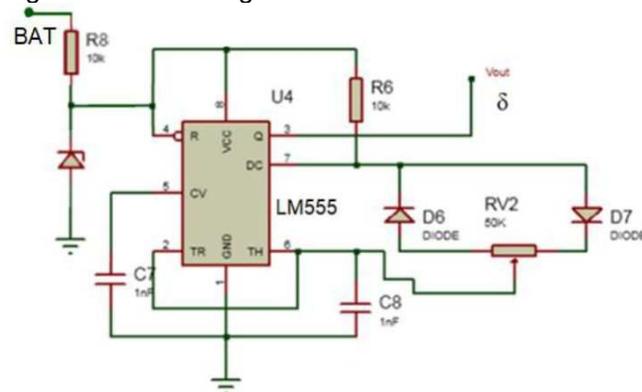
Na equação (11) é utilizada a recomendação de que a variação da corrente no indutor seja $\Delta I_L = 0,2 I_{saída}$, resultando em uma corrente máxima de saída de 4 A.

A capacitância mínima do capacitor C é determinado através da equação (12), considerando uma tensão de ondulação de 5% em relação a tensão de entrada.

$$C_{min} = \frac{\Delta I_L}{8f \Delta V_{saída}} = 91 \mu F \approx 100 \mu F \quad (12)$$

A geração de sinal para chaveamento do MOSFET, com ciclo de trabalho de 0,6 e frequência de 20 kHz é realizada através do circuito integrado 555 configurado no modo astável. É utilizado no projeto o LM555 com capacitor de 1 nF e um divisor de tensão com um resistor de 10 kΩ e um potenciômetro de 50 kΩ para ajustar o valor desejado. A Figura 27 ilustra o esquema elétrico do circuito gerador de sinal.

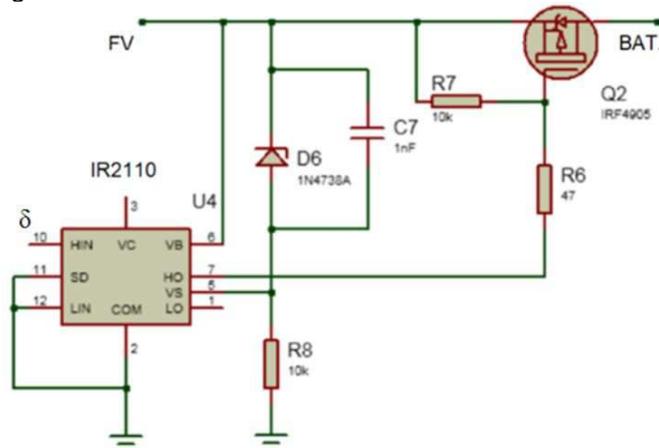
Figura 27 - Circuito gerador de sinal.



Fonte: (FIRMAN et al., 2022, fig. 4 (a))

Além disso, foi utilizado o driver de MOSFET IR2110 para o funcionamento adequado do MOSFET de saída IRF4905. A Figura 28 ilustra o esquema elétrico do circuito de acionamento do MOSFET.

Figura 28 - Circuito de acionamento do MOSFET.



Fonte: (FIRMAN et al., 2022, fig. 4 (b))

3.3 Controlador de carga solar MPPT

O controlador de carga projetado por (ASCAS, [s.d.]) tem todo o seu desenvolvimento disponibilizado na internet para que qualquer pessoa consiga produzir o equipamento. Ele é um controlador MPPT de baixo custo visando ser uma forma alternativa aos controladores disponíveis comercialmente que geralmente possuem um custo elevado.

O controlador proposto tem as seguintes especificações:

- a) algoritmo MPPT pertuba e observa;
- b) entrada de 80 V e 60 A, permitindo o uso de placa solar e turbina eólica;
- c) saída de 50 V e 35 A, para carregamento de baterias de chumbo ácido e íons de lítio;
- d) protocolo de proteção da bateria;
- e) tela LCD;
- f) telemetria.

A Figura 29 ilustra o controlador de carga.

Figura 29 - Controlador de carga MPPT de 1kW.



Fonte: (ASCAS, [s.d.])

3.3.1 Desenvolvimento

O desenvolvimento do projeto foi realizado de forma que o controlador tivesse uma boa eficiência energética, tivesse uma potência de saída de 1000 W, além de recursos de telemetria.

3.3.1.1 Módulo ESP32

O módulo ESP32 é utilizado para ser centro de processamento de dados. Foi escolhido devido à simplicidade de programação, além de possuir um microcontrolador de 32 bits com dois núcleos e 240 MHz, resolução PWM de 16 bits e conexão sem fio. A Figura 30 ilustra o módulo ESP-WROOM-32.

Figura 30 - Módulo ESP-WROOM-32.

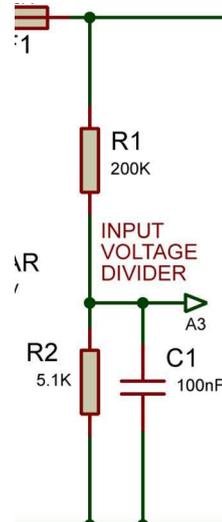


Fonte: (ASCAS, [s.d.])

3.3.1.2 Módulo ADS1015

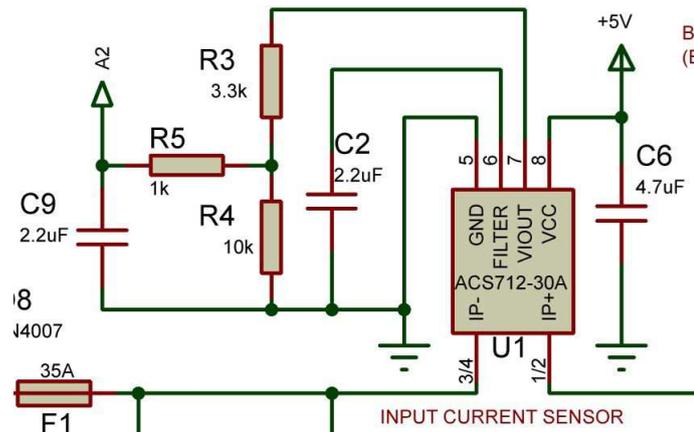
Para o funcionamento do algoritmo MPPT é necessário que o módulo ESP32 receba os valores de corrente e tensão através de sensores. Para o monitoramento da tensão foi utilizado um divisor de tensão ilustrado através da Figura 31 e para o monitoramento da corrente elétrica foi utilizado o sensor ACS712-30A ilustrado através da Figura 32.

Figura 31 - Esquema elétrico do divisor de tensão de entrada.



Fonte: (ASCAS, [s.d.])

Figura 32 - Esquema elétrico do sensor de corrente de entrada.



Fonte: (ASCAS, [s.d.])

O módulo ESP32 possui um conversor analógico-digital (ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*) integrado de 12 bits, ou seja, possui 4096 valores para representar a tensão e a corrente. Portanto, para uma configuração de 80 V e 30 A, é possível utilizar uma resolução de 19,5 mV para tensão e 7,32 mA para a corrente. Porém, o ADC do módulo não é tão preciso porque possui uma resposta não linear.

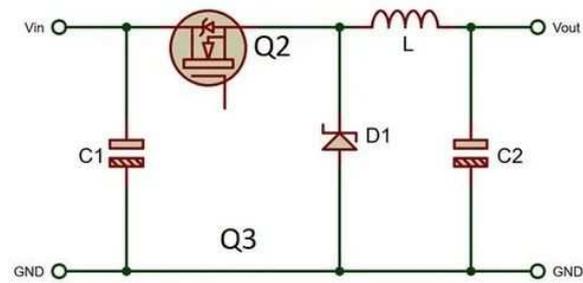
A solução foi utilizar um ADC externo, ADS1015 da Texas Instruments, que também possui 12 bits. A diferença se dá pela estabilidade, que é necessária para que o algoritmo MPPT funcione adequadamente.

3.3.1.3 Conversor Buck Síncrono

O conversor buck é o responsável por regular a tensão a ser entregue à bateria. Dessa forma, o conversor buck recebe a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos e ajusta a tensão para não danificar a bateria.

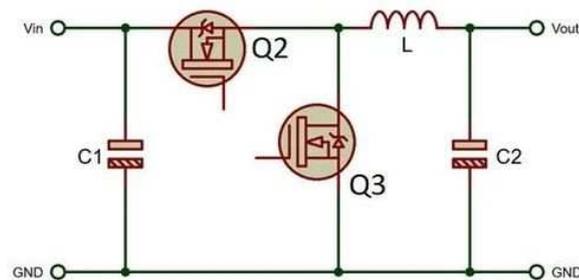
O conversor buck síncrono foi escolhido para que o controlador tivesse uma maior eficiência. O conversor buck convencional, com diodo, possui uma eficiência entre 75% e 87%, enquanto que o síncrono possui uma eficiência entre 88% e 98% (ASCAS, [s.d.]). A Figura 33 ilustra o esquema elétrico do conversor buck assíncrono enquanto que a Figura 34 ilustra o esquema elétrico do conversor buck síncrono.

Figura 33 - Conversor buck assíncrono.



Fonte: (ASCAS, [s.d.])

Figura 34 - Conversor buck síncrono.



Fonte: (ASCAS, [s.d.])

O funcionamento entre os MOSFETs Q2 e Q3 é simples. Quando Q2 está ligado, Q3 deve ficar desligado e quando Q3 está ligado, Q2 fica desligado. Além disso, deve ser respeitado o tempo morto, ou seja, o tempo entre o ligamento de um e o desligamento do outro, para que os dois não liguem ao mesmo tempo ocasionando um curto-circuito.

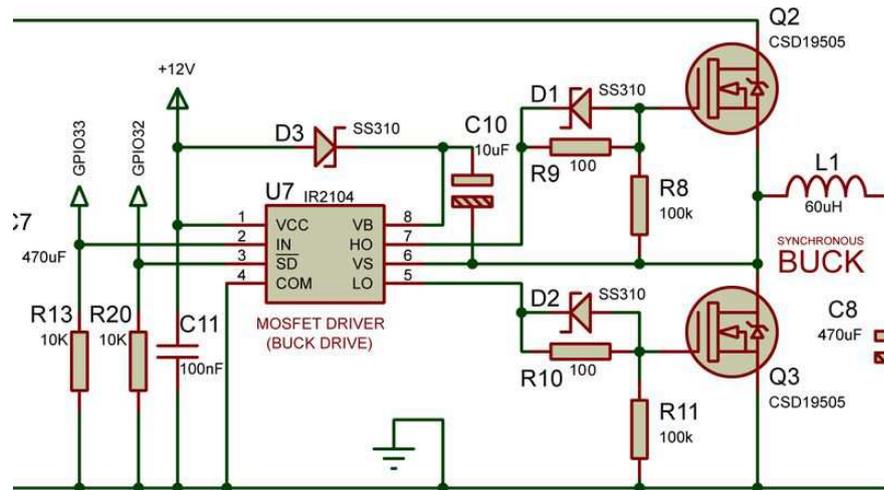
3.3.1.3.1 Controle de sincronismo

O sincronismo entre as chaves do conversor buck é realizado através do driver de MOSFET IR2104. O driver já possui a função de tempo morto integrada que torna o processo de codificação mais fácil.

O IR2104 possui duas entradas lógicas IN e SD. A entrada IN é usada como entrada para o sinal PWM e a entrada SD é a entrada de habilitação. Dessa forma, quando a entrada SD está com nível lógico baixo, Q2 e Q3 estão desligados independentemente do sinal PWM na entrada IN. Quando a entrada SD está com nível

lógico alto, Q2 ou Q3 serão ativados, dependendo estado lógico em IN. Dessa forma, quando IN está com nível lógico alto, Q2 está ligado e Q3 desligado. O contrário ocorre quando o nível lógico de IN é baixo, ou seja, Q2 está desligado e Q3 ligado. A Figura 35 ilustra o esquema elétrico do circuito de sincronismo.

Figura 35 - Esquema elétrico do circuito de sincronismo.



Fonte: (ASCAS, [s.d.]

Com isso, é possível controlar os dois MOSFETs com apenas um sinal PWM, dispensando o uso de dois sinais PWM complementares. Porém, ocorre um problema que Q3 passa a atuar como um curto quando o ciclo de trabalho é igual a 0%. A solução desse problema foi implementada através do software impedindo que o ciclo de trabalho chegue a 0%. Para isso, foi criado um valor mínimo de ciclo de trabalho através da fórmula

$$D_{min} = \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} 100 \quad (13)$$

Isso implica que, o ciclo de trabalho nunca seja inferior ao D_{min} . A equação (13) utiliza uma relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada para calcular o ciclo de trabalho quando não há carga, para produzir uma tensão correspondente a tensão da bateria conectada a saída.

3.3.1.3.2 Indutor

Para o projeto do controlador, era necessário que o conversor buck tivesse um indutor de 60 μH . Dessa forma, foi projetado um indutor utilizando um núcleo de ferrite toroidal com as seguintes especificações:

- a) permeabilidade relativa: 60;
- b) diâmetro interno: 19,5 mm;
- c) diâmetro externo: 33,5 mm;
- d) altura: 11 mm;

Com essas informações, utilizou-se ferramentas que forneciam o número de voltas que o fio de cobre deveria ter em torno do núcleo toroidal. Com isso, foi obtido um número de 30 voltas para um fio bitola AWG 16. O que ao final resultou em um indutor com 64 μH .

3.3.1.4 Algoritmo MPPT

O algoritmo MPPT é responsável pela transferência de toda a potência fornecida pela fonte para a bateria. O algoritmo funciona monitorando a tensão e a corrente para alterar o chaveamento dos MOSFETs e assim aumentar ou diminuir a potência fornecida à bateria.

O algoritmo implementado é do tipo Perturba e Observa. Ele capta os dados dos sensores, calcula a potência, aplica uma pequena perturbação e verifica novamente a potência. A ideia é que o algoritmo faça a verificação periodicamente para aproveitar a potência instantânea fornecida.

4 SOLUÇÕES COMERCIAIS

As seguir estão listadas algumas soluções comerciais disponíveis.

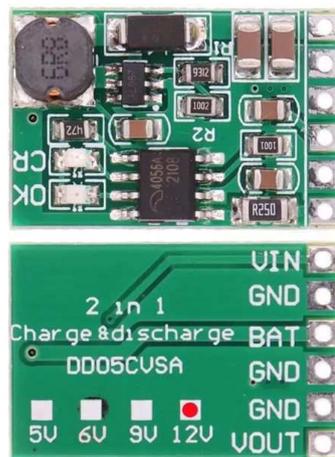
4.1 Carregador móvel de energia solar

O carregador móvel modelo DD05CVSA é realiza o controle de carga de descarga de pilhas de íons de lítio de 3,7 V. É um carregador simples e de baixo custo que possui as seguintes especificações:

- a) entrada para painel solar de 4,5 V a 8V;
- b) corrente de carga até 1 A;
- c) saída de 6 W.

A Figura 36 ilustra o carregador móvel.

Figura 36 - Carregador móvel.



Fonte: ("Carregador de energia móvel solar", [s.d.]

4.2 Controlador de carga solar

O controlador de carga solar XH-M600 ilustrado através da Figura 37 possui uma entrada para painel fotovoltaico e uma saída para bateria. O ajuste da tensão de carregamento é realizado através de botões. Além disso, o controlador suporta uma tensão de entrada de até 60 V com corrente de até 800 mA.

Figura 37 - Controlador de carga XH-M600.

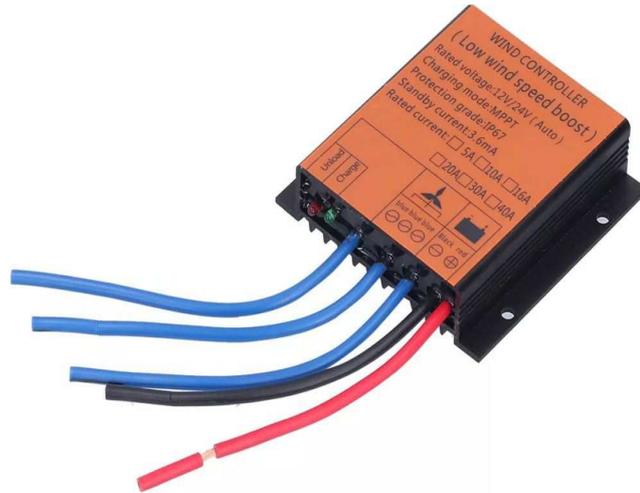


Fonte: ("Controlador Carga Xh-m600", [s.d.])

4.3 Controlador de carga eólico

O controlador de carga eólico encontrado comercialmente, ilustrado através da Figura 38, é utilizado para turbinas eólicas trifásicas. Possui modelos PWM e MPPT.

Figura 38 - Controlador de carga eólico.



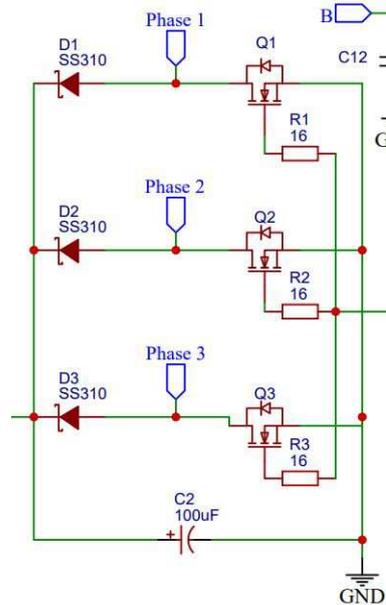
Fonte: ("Controlador De Turbina Eólica Regulador De Carga Mppt", [s.d.]

O controlador possui as seguintes características:

- a) tensão de saída: 12 V, 24 V ou 48 V;
- b) corrente de saída: 5 A, 10 A, 16 A, 20 A, 30 A ou 40 A;
- c) proteções de sobrecarga, descarga profunda, inversão de polaridade da bateria e travamento da turbina eólica.

Em situações em que a velocidade dos ventos seja superior a velocidade que a turbina eólica suporta, o controlador de carga coloca as três fases em curto-circuito fazendo com que a turbina diminua a velocidade até a sua completa imobilização. A Figura 39 ilustra o esquema elétrico da ponte retificadora trifásica com a utilização de MOSFETs para acionamento simultâneo, provocando o curto-circuito.

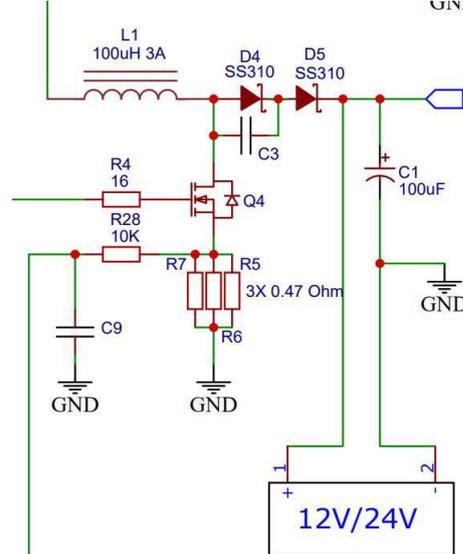
Figura 39 - Ponte retificadora trifásica com MOSFETs.



Fonte: ("MPPT Wind charge controller reverse engineering", 2020)

O controlador também possui um conversor boost, ideal para o aumento da potência fornecida a bateria para um melhor aproveitamento da energia gerada. A Figura 40 ilustra o conversor boost.

Figura 40 - Conversor boost do controlador eólico.



Fonte: ("MPPT Wind charge controller reverse engineering", 2020)

O chaveamento do MOSFET Q4 do conversor boost é realizado através de circuitos comparadores de tensão como o LM2901 e o LM2903 presentes no circuito do controlador.

4.4 Controlador de carga híbrido

O controlador de carga híbrido ilustrado através da Figura 41, é um controlador de carga que possui entradas para painéis solares e turbinas eólicas trifásicas.

Possui display LCD, algoritmo MPPT e três estágios de carregamento de bateria. Conta com configuração rápida para utilização de baterias de chumbo ácido, LiFePO4 e lítio ternário, além da personalização das configurações de carga e descarga da bateria. O controlador também possui entrada para o resistor de frenagem, responsável pela proteção da turbina eólica para situações em que a velocidade do vento seja superior ao recomendado pela fabricante da turbina.

Figura 41 - Controlador híbrido.



Fonte: (“Controlador Solar Híbrido MPPT Vento - AliExpress”, [s.d.])

Este controlador possui diversos modelos a depender da potência desejada. A Tabela 1 com ilustra os modelos de acordo com a potência.

Tabela 1 - Modelos disponíveis

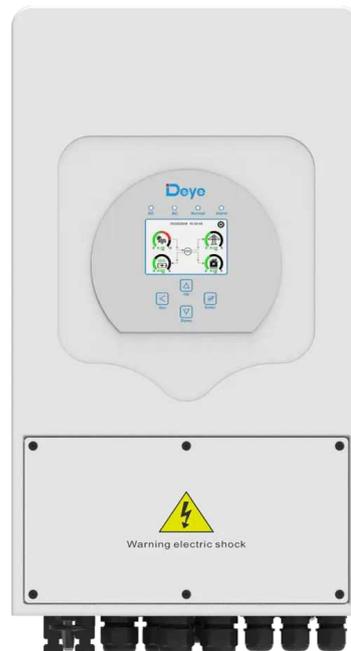
Modelo		600 W	1000 W	1200 W	1600 W	2000 W	2400 W	3000 W
Tensão do sistema (V)		12		24		48		
Módulo solar	Corrente (A)	25	40	25	33	20	25	33
	Potência (W)	300	500	600	800	1000	1200	1500
Turbina eólica	Corrente (A)	25	40	25	33	20	25	33
	Potência (W)	300	500	600	800	1000	1200	1500
Bateria	Corrente máx. (A)	30		30		33		

Fonte: (“Controlador Solar Híbrido MPPT Vento - AliExpress”, [s.d.]

4.5 Inversor híbrido on-grid

O inversor da SUN-5K-SG01 da empresa Deye ilustrado através da Figura 42 é capaz de atender cargas de até 5000 W. Ele possui entradas para painel solar e rede elétrica convencional e também aceita baterias do tipo chumbo ácido e íons de lítio.

Figura 42 - Inversor SUN-5K-SG01 da Deye.



Fonte: (“SUN-5K-SG01 Deye Inversores Brasil”, [s.d.]

O inversor pode trabalhar tanto no modo on-grid, injetando energia elétrica na rede, como no modo off-grid. Conta também com rastreadores MPPT e também suporte a sistemas BMS na utilização de baterias de íons de lítio.

4.6 Estação de energia portátil da EcoFlow

O modelo River 2 PRO da EcoFlow é uma estação de energia portátil com inversor de onda senoidal pura capaz de fornecer uma potência de saída de 800 W, podendo aumentar até 1600 W através de configurações no aplicativo. Sua bateria possui uma capacidade de 768 Wh e possui quatro formas de ser carregada, sendo elas através da rede elétrica convencional, painel fotovoltaico de até 220 W, tomada veicular e porta USB-C. A Figura 43 ilustra a estação de energia portátil River 2 PRO.

Figura 43 - Estação portátil River 2 PRO.



Fonte: (“EcoFlow | Timber - Power Station RIVER 2 Pro – ECOFLOW | TIMBER”, [s.d.]

A estação possui outros recursos como:

- a) quatro saídas CA;
- b) três entradas USB-A de 12 W;
- c) uma entrada e saída USB-C de 100 W;

- d) duas tomadas 12 V DC-5521;
- e) uma tomada 12 V no padrão veicular.

4.7 Estação de energia portátil da Bluetti

A estação de energia portátil AC200MAX da Bluetti ilustrada através da Figura 44 possui um inversor de onda senoidal pura e atende uma grande variedade de equipamentos de até 2200 W, suportando picos de até 4800 W. Com capacidade de 2048 Wh, a estação de energia ainda permite a conexão de até dois módulos de baterias, expandindo a capacidade para até 8192 Wh.

Figura 44 - Bluetti AC200MAX.



Fonte: ("BLUETTI AC200MAX Central Elétrica Expansível", [s.d.]

A AC200MAX possui sete maneiras de recarregar a bateria, podendo ser através da rede elétrica convencional, de placa solar, de conexão com o carro, e até baterias de chumbo ácido. A estação possui entrada para placa solar com potência máxima de 900 W. Além de possuir outros recursos como:

- a) quatro saídas CA;
- b) uma porta USB-C de 100W;

- c) duas portas USB-A de 5 V e 3A;
- d) uma tomada de 12 V e 30 A;
- e) uma tomada de 12 V e 10 A;
- f) duas tomadas de 12 V e 10 A para conector borne DC-5521;
- g) duas bases de carregamento sem fio de 15 W cada;

5 CONSIDERAÇÕES

Os controladores de cargas presentes neste trabalho possuem recursos que variam de acordo com sua proposta, mas todos eles exercem a mesma função de realizar o carregamento da bateria de forma eficiente preservando assim sua vida útil. A seguir, são realizadas algumas considerações sobre os controladores descritos no trabalho.

5.1 Controlador de carga e descarga para turbina eólica

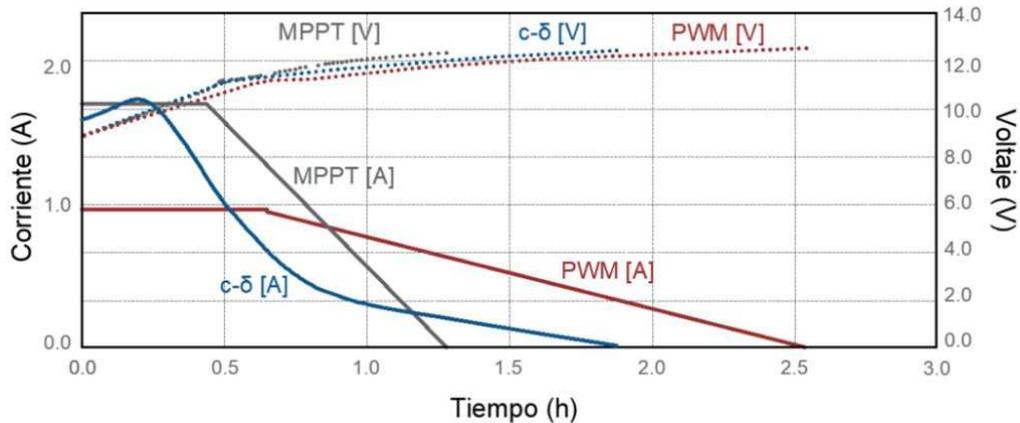
O controlador de carga e descarga para a turbina eólica WG-910 desenvolvido junto ao circuito dobrador de tensão é um controlador simples e eficiente. Ele possui pequenos ajustes de tensão, através dos trimpots, para escolher o melhor nível de tensão de carga e descarga da bateria. Por ser um projeto voltado para a turbina eólica WG-910 especificamente, o controlador se torna limitado a atender as especificações da turbina ou de turbinas monofásicas com as mesmas especificações.

Esse controlador também pode ser utilizado com painéis fotovoltaicos mas o circuito dobrador de tensão não pode ser utilizado uma vez que esse circuito funciona apenas com tensão alternada.

5.2 Controlador de carga solar com ciclo de trabalho constante

O controlador de carga com ciclo de trabalho constante é uma ótima alternativa aos controladores tradicionais disponíveis no mercado. A Figura 45 ilustra os gráficos de corrente, com linha contínua, e de tensão, com linha pontilhada, para simulações realizadas com o controlador de ciclo contínuo (c- δ), controlador PWM e controlador MPPT.

Figura 45 - Corrente e tensão de carregamento para os três modelos.



Fonte: (FIRMAN et al., 2022, fig. 8)

É possível perceber através da figura que o carregamento da bateria através do controlador de carga de ciclo constante foi mais rápido que o carregamento através do controlador PWM e mais lento que o MPPT. O MPPT realizou a recarga da bateria em aproximadamente 75 minutos, o controlador de ciclo constante em aproximadamente 108 minutos e o controlador de ciclo constante em aproximadamente 150 minutos.

Em substituição ao painel fotovoltaico, utilizado na simulação, é possível utilizar turbinas eólicas monofásicas com tensões de até 21 V. Para utilização de turbinas trifásicas é necessário a utilização de uma ponte retificadora.

5.3 Controlador de carga solar MPPT

O controlador de carga solar MPPT é o projeto mais complexo, porém é o mais eficiente e que conta com recursos, como telemetria. O uso do conversor buck síncrono tornou o projeto mais difícil pois exigiu um controle preciso dos MOSFETS através de software. Além disso, para a potência desejada, torna-se necessário a fabricação do indutor do conversor, devido à dificuldade de encontrá-lo no mercado.

O projeto já suporta turbinas eólicas monofásicas e consegue extrair a máxima potência da turbina devido ao seu algoritmo MPPT. Para utilização de turbinas trifásicas, torna-se necessário a utilização de uma ponte retificadora.

5.4 Inversor híbrido on-grid/off-grid e estações portáteis de energia

Os inversores híbridos on-grid/off-grid são equipamentos que tem uma maior potência e permitem a geração de créditos de energia. Esse equipamento possui recursos como suporte a BMS das baterias, algoritmo MPPT, além de telemetria através de aparelhos celulares, permitindo o controle do equipamento de forma remota.

Já as estações portáteis de energia são uma solução versátil que integra funções tanto do controlador de carga quanto dos inversores. Com a evolução tecnológica das baterias, essas estações podem atuar como sistemas de emergência, fornecendo energia elétrica de maneira confiável.

6 CONCLUSÃO

Os controladores de carga são equipamentos essenciais para o carregamento adequado e preservação da vida útil da bateria. São dispositivos relativamente simples mas que podem aumentar sua complexidade de acordo com a potência desejada, número de fontes utilizadas, recursos para um melhor aproveitamento de energia e funcionalidades extras.

Devido à sua simplicidade, a utilização de controladores de carga se torna limitada, sendo recomendado sua utilização em sistemas pequenos de baixa potência e que atendam cargas de corrente contínua ou em lugares onde o acesso à energia elétrica é limitado.

A utilização de controladores de carga em sistemas que garantem a disponibilidade energética é pouco recomendado pois necessitam de baterias e inversores, que são os equipamentos de maior custo. Além disso, esse tipo de sistema fica limitado ao uso de uma única bateria de grande capacidade ou de um banco de baterias, necessitando de um BMS para o balanceamento de carga.

Os inversores híbridos on-grid/off-grid e as estações portáteis de energia combinam múltiplas funções em uma única unidade, tornando-se mais atrativos do que as soluções que utilizam vários componentes vendidos separadamente. Podendo atender diversos tipos de carga, esses equipamentos são ideais para sistemas maiores, fornecendo energia elétrica de maneira confiável e eficiente.

REFERÊNCIAS

910-Fault-Finding-Manual.pdf. Disponível em: <<https://www.marlec.co.uk/wp-content/uploads/2008/10/910-Fault-Finding-Manual.pdf>>. Acesso em: 31 maio. 2024.

ASCAS. **1kW Arduino MPPT Solar Charge Controller (ESP32 + WiFi)**. Disponível em: <<https://www.instructables.com/DIY-1kW-MPPT-Solar-Charge-Controller/>>. Acesso em: 2 maio. 2024.

BLUETTI AC200MAX Central Elétrica Expansível. Disponível em: <<https://br.bluettipower.com/products/ac200max-estacao-de-energia>>. Acesso em: 2 jun. 2024.

Carregador de energia móvel solar. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005005591877546.html?spm=a2g0o.detail.pcDetailTopMoreOtherSeller.2.3e0dsyCvsyCv36&gps-id=pcDetailTopMoreOtherSeller&scm=1007.40000.327270.0&scm_id=1007.40000.327270.0&scm-url=1007.40000.327270.0&pvid=7b3f528d-dd63-4dc1-9743-89e596a8361d&_t=gps-id:pcDetailTopMoreOtherSeller,scm-url:1007.40000.327270.0,pvid:7b3f528d-dd63-4dc1-9743-89e596a8361d,tpp_buckets:668%232846%238114%231999&pdp_npi=4%40dis%21BRL%215.73%215.67%21%21%217.73%217.65%21%402101fb1617141617531615550e99a0%2112000033671490847%21rec%21BR%21%21AB&utparam-url=scene%3ApcDetailTopMoreOtherSeller%7Cquery_from%3A&search_p4p_id=202404261302332033952082917394201932_1>. Acesso em: 3 maio. 2024.

Controlador Carga Xh-m600. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2060748835-controlador-carga-modulo-660v-30a-eolico-solar-xh-m600-led-_JM>. Acesso em: 28 maio. 2024.

Controlador De Turbina Eólica Regulador De Carga Mppt. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-3571362125-controlador-de-turbina-eolica-regulador-de-carga-mppt-de-bai-_JM#is_advertising=true&position=2&search_layout=stack&type=pad&tracking_id=d06270d7-9844-49e7-8f49-a3b6344270dd&is_advertising=true&ad_domain=VQCATCORE_LST&ad_position=2&ad_click_id=NDliM2lxM2UtMjRkNy00ZjA3LTg0NTEtZWU5ZTQ3ZmM5NTJm>. Acesso em: 2 jun. 2024.

Controlador Solar Híbrido MPPT Vento - AliExpress. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005006718799607.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=>>. Acesso em: 27 maio. 2024.

EcoFlow | Timber - Power Station RIVER 2 Pro – ECOFLOW | TIMBER. Disponível em: <<https://ecoflow-timber.com.br/products/river2-pro>>. Acesso em: 2 jun. 2024.

FIRMAN, A. D. et al. REGULADOR DE CARGA SOLAR DE CICLO ÚTIL CONSTANTE PARA BATERÍAS DE ION-LITIO. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, p. 1–8, 16 ago. 2022.

IPower-Plus Series(220/230VAC) 350~5000W Pure Sine Wave Inverter. EPEVER, 5 nov. 2022. Disponível em: <<https://epeer.com/product/ipower-plus-220-230vac-pure-sine-wave-inverter/>>. Acesso em: 31 maio. 2024

LS-B Series(10~30A) PWM Charge Controller. EPEVER, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.epeer.com/product/lsb-10-30a-pwm-charge-controller/>>. Acesso em: 30 maio. 2024

Manual-tecnico-Moura-Solar-MS-V1.4-POT.pdf. Disponível em: <<https://www.moura.com.br/produtos/estacionarias/solar/Manual-tecnico-Moura-Solar-MS-V1.4-POT.pdf>>. Acesso em: 28 maio. 2024.

MPPT Wind charge controller reverse engineering. MPPT Wind charge controller reverse engineering ~ Simple Projects, 18 jul. 2020. Disponível em: <<https://mousa-simple-projects.blogspot.com/2020/07/mppt-wind-charge-controller-reverse.html>>. Acesso em: 2 jun. 2024

NETO, J. L. DA S. **Desenvolvimento de um sistema de gestão de baterias para veículos elétricos**. masterThesis—[s.l.: s.n.].

NIPO, D. F. **Controlador de carregamento de baterias para turbinas eólicas de pequeno porte**. masterThesis. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5460>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

PETRY, C. A. - OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CC-CC. **Eletrônica de Potência**, [s.d.].

Rutland HRSi Regulator – ABS Alaskan, Inc. Disponível em: <<https://absak.com/product/rutland-hrsi-regulator/>>. Acesso em: 30 maio. 2024.

SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. ago. 2009.

SUN-5K-SG01 Deye Inversores Brasil. Disponível em: <<https://pt.deyeinverter.com/product/hybrid-inverter-1/sun3.6-5ksg01-03lp1eu.html>>. Acesso em: 2 jun. 2024.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2ª ed. [s.l.] Érica, 2012.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, maio 2009.