

# Controle de Carga de Bateria com Placa Voltaica

Lucas Eduardo Schlenert de Oliveira<sup>1</sup>, Manoella Rockembach<sup>1</sup>, Rodrigo Ferraz Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

engcomp.lucasedu@gmail.com

manu.rockemba@gmail.com

dev.rodrigofs@gmail.com

**Abstract.** *This report delves into the development of a battery charge control system using a voltaic plate, specifically for a Lead-Acid battery (12V 5Ah). The core of this project revolves around the use of PWM control to manage the voltage and current from the plate to the battery, ensuring efficient energy management. The system aims to control the battery's charging in various States of Charging, ensuring efficient and safe charging. Furthermore, the project seeks to integrate communication with external systems, transmitting voltage and current data to a rain gauge project server via an MQTT Broker. A mobile application will also allow local access to charging data via Access point to the ESP server. Advanced features, such as alert systems, are proposed, but due to time constraints, they might not be incorporated.*

**Resumo.** *Este relatório aprofunda-se no desenvolvimento de um sistema de controle de carga de bateria usando uma placa voltaica, especificamente para uma bateria de Chumbo-Ácido (12V 5Ah). O cerne deste projeto gira em torno do uso do controle PWM para gerenciar a tensão e a corrente da placa para a bateria, garantindo uma gestão eficiente de energia. O sistema visa controlar o carregamento da bateria em vários Estados de Carga, assegurando um carregamento eficiente e seguro. Além disso, o projeto busca integrar a comunicação com sistemas externos, transmitindo dados de tensão e corrente para um servidor de projeto de pluviômetro via um Broker MQTT. Um aplicativo móvel também permitirá o acesso local aos dados de carregamento via Ponto de Acesso ao servidor do ESP. Funcionalidades avançadas, como sistemas de alerta, são propostas, mas devido a limitações de tempo, elas podem não ser incorporadas.*

## 1. Introdução

Em um mundo crescentemente voltado para soluções sustentáveis, a gestão eficiente de energia torna-se uma prioridade. Neste contexto, o presente documento aborda o desenvolvimento de um sistema de controle de carga de bateria de **Chumbo-Ácido (12V 5Ah)** utilizando uma placa voltaica. O cerne deste projeto é a utilização de um controle PWM para gerenciar a tensão e corrente da placa em direção à bateria, garantindo uma gestão eficaz da energia.

O sistema controlará o carregamento da bateria em diversos *States of Charging*, assegurando um carregamento eficiente e seguro, o que contribui para maximizar o tempo

de vida da bateria. Além da eficiência no controle de energia, o projeto visa uma comunicação integrada com sistemas externos. Os dados de tensão e corrente serão transmitidos para um servidor do projeto do pluviômetro por meio de um *Broker MQTT*. Adicionalmente, um aplicativo móvel permitirá o acesso local aos dados de carregamento via ponto de acesso ao servidor do ESP. Como um diferencial, há a proposta de implementar um sistema de alertas. No entanto, devido a limitações de tempo, essa funcionalidade pode não ser incorporada. Caso seja, os alertas serão gerados pelo servidor já existente, com base nas entradas de dados dos sensores. Uma inovação desejada é que, ao identificar uma situação crítica, uma notificação de alerta seja enviada ao aplicativo móvel do usuário por meio do *Google Firebase*.

Neste documento, após a introdução, apresentaremos uma seção dedicada à revisão metodológica. Nela, discutiremos a metodologia adotada para a realização da revisão, incluindo os critérios de inclusão e exclusão, bem como o processo de seleção de estudos relevantes. Uma análise aprofundada dos resultados obtidos será realizada, onde as principais descobertas serão sintetizadas.

Na sequência, introduziremos uma seção sobre o desenvolvimento do projeto. Esta parte detalhará o planejamento, desenvolvimento e testes realizados, oferecendo uma visão abrangente de todas as etapas e processos envolvidos na execução do projeto, garantindo transparência e compreensão claras de nossas metodologias e resultados.

## 2. Revisão Rápida

### 2.1. Metodologia

Com o intuito de realizar uma revisão rápida, as seguintes strings de pesquisa foram construídas e aplicadas nas bases de referência IEEE, Web of Science e Scopus:

- (*"photovoltaic"*OR *"solar panel"*OR *"PV"*) AND (*"PWM"*OR *"Pulse Width Modulation"*) AND (*"charge controller"*OR *"charge regulator"*OR *"charging technique"*) AND (*"lead-acid"*OR *"VRLA"*)
- (*"battery charging"*OR *"charge regulation"*OR *"charge control"*) AND (*"SoC"*OR *"State of Charging"*OR *"charging state"*OR *"battery status"*) AND (*"lead-acid"*OR *"Pb-acid"*OR *"VRLA"*) AND (*"efficiency"*OR *"safety"*OR *"parameters"*OR *"measures"*OR *"best practices"*)

As strings encontraram ao todo 62 artigos nas bases usadas, excluindo os 30 artigos duplicados detectados pelo *Rayyan*, a ferramenta usada para a seleção primária da literatura encontrada.

#### 2.1.1. Critérios de Inclusão e Exclusão

Para orientar a seleção dos artigos e a extração das informações, foram utilizadas as perguntas de pesquisa mostradas abaixo:

1. Quais são os métodos mais eficientes e amplamente utilizados para controlar a tensão e corrente de placas fotovoltaicas usando PWM?
2. Quais são os métodos mais precisos e confiáveis para estimar o estado de carregamento (SoC) de baterias, especialmente de chumbo-ácido, em sistemas fotovoltaicos autônomos?

3. Quais parâmetros e medidas são essenciais para carregar uma bateria com eficiência e segurança utilizando controle PWM?
4. Existem diferenças significativas no carregamento de baterias de lítio e chumbo-ácido quando utilizadas em sistemas fotovoltaicos com controle PWM?
5. Qual é a eficácia do controle PWM em comparação com outros métodos de controle em sistemas fotovoltaicos?
6. Considerando a flexibilidade da arquitetura proposta, quais são os desafios associados à sua implementação e manutenção em um ambiente real?

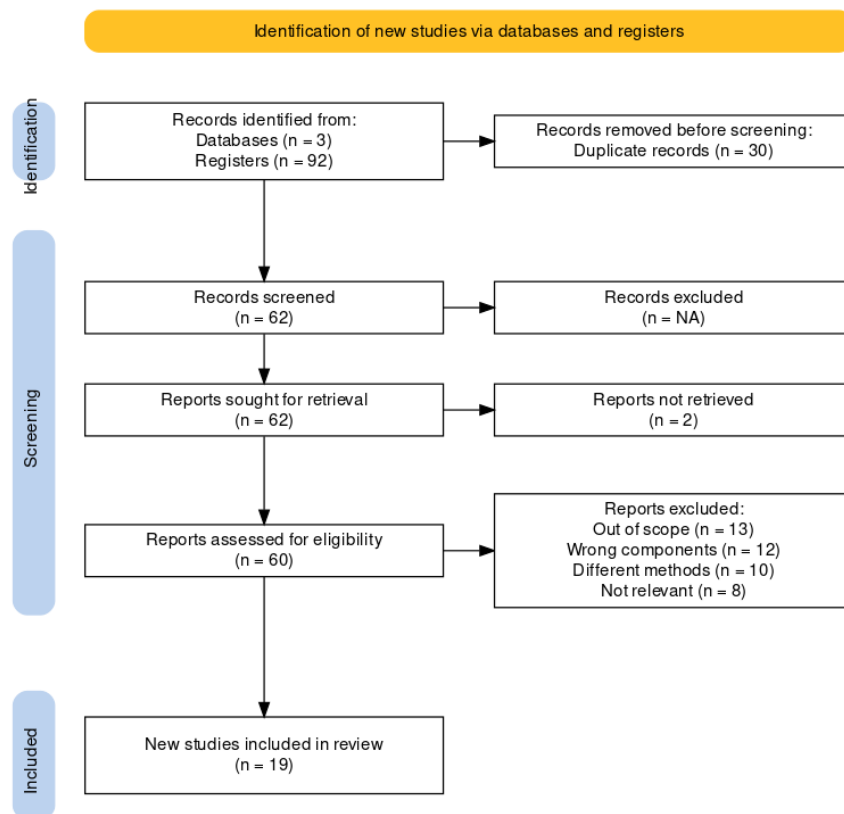
Com base nestas perguntas, regras para seleção foram criadas e organizadas em uma tabela de critérios de inclusão e exclusão de artigos, mostrado a seguir.

<b>Critério</b>	<b>Cumpre o Critério</b>	<b>Não Cumpre o Critério</b>
Utiliza métodos para controlar a tensão e corrente de placas fotovoltaicas usando PWM?	Próximo critério.	Exclusão.
Utiliza métodos para estimar o estado de carregamento (SoC) de baterias em sistemas fotovoltaicos autônomos?	Próximo critério.	Exclusão.
Utiliza de baterias de chumbo-ácido?	Inclusão.	Próximo critério.
Discute quais parâmetros e medidas são essenciais para carregar uma bateria com eficiência e segurança utilizando controle PWM?	Inclusão.	Exclusão.

### 2.1.2. Seleção de Estudos

A partir da leitura dos resumos dos artigos, e considerando as perguntas de pesquisa, foram analisados todos os 62 artigos. Destes, 17 artigos foram incluídos na revisão e 43 artigos foram descartados. Os motivos para exclusão são os seguintes: 13 artigos estão fora do escopo de pesquisa, 12 usam componentes errados, 10 aplicam métodos diferentes, 8 não são relevantes para esta revisão e 2 não foi possível obter o PDF.

A análise quantitativa de cada etapa no processo de seleção de artigos pode ser melhor visualizada no diagrama a seguir:



**Figura 1. Diagrama gerado no PRISMA**

## 2.2. Resultados e Discussão

### 2.2.1. Tipos de Baterias Estudadas

A predominância das baterias de chumbo-ácido nos estudos reflete sua ampla utilização na indústria e pesquisa. [Wang et al. 2021] exploraram a determinação online do estado das baterias de chumbo-ácido para a gestão energética de veículos. No entanto, baterias de lítio e VRLA também foram mencionadas, indicando uma diversidade de aplicações e contextos de pesquisa [Alvarez Anton et al. 2013, Faiz et al. 2021, Chmielewski et al. 2018, Lavety et al. 2019, Lin et al. 2016].

### 2.2.2. Métodos de Controle

Os métodos de controle variam desde técnicas tradicionais, como PWM, até abordagens mais inovadoras. [Faiz et al. 2021] utilizaram a Modulação por Largura de Pulso (PWM) em um controlador de carga solar, enquanto [Singh and Mishra 2013] propuseram um carregador bidirecional de bateria otimizado com feedback-clamped. Outros estudos, como [Dufo-Lopez et al. 2015, Victor et al. 2019, Antonov et al. 2019, Yoomak et al. 2018, Teo et al. 2013, Belarbi et al. 2019], também destacaram a importância e eficácia de diferentes técnicas de controle para otimizar a carga da bateria.

### **2.2.3. Estimação do SoC**

A estimativa do SoC é crucial para a gestão eficaz da bateria. [Wang et al. 2021] empregaram um algoritmo de estimativa colaborativa para determinar o estado das baterias de chumbo-ácido. Por outro lado, [Alvarez Anton et al. 2013] utilizaram Máquinas de Vetores de Suporte para estimar o SoC de uma bateria de lítio. Além disso, [Dufo-Lopez et al. 2015] e [Maithili et al. 2021] também abordaram a importância da estimativa precisa do SoC para garantir a eficiência e longevidade da bateria.

### **2.2.4. Eficiência Energética**

A eficiência energética é um pilar central nos estudos revisados. [Singh and Mishra 2013] relataram eficiências máximas de 90,24% e 92,7% em diferentes modos de operação de seu protótipo. [Faiz et al. 2021] destacaram uma eficiência de 94% para carga de bateria e 93% para carga total em seu controlador de carga solar. Outros estudos, como [Huang et al. 2010, Lin et al. 2016, Yoomak et al. 2018], também enfatizaram a importância da eficiência energética na gestão de baterias.

### **2.2.5. Desafios de Implementação**

A implementação de sistemas de bateria eficientes não está isenta de desafios. [Gies 2009] explorou a necessidade de ventilação de gás hidrogênio em equipamentos elétricos contendo baterias de chumbo-ácido. Por outro lado, [Victor et al. 2019] discutiram a importância de escolher o controlador de carga correto para otimizar a eficiência. Além disso, [Akbar et al. 2016] e [Teo et al. 2013] abordaram os desafios associados à modelagem dinâmica e otimização de sistemas de geração de energia autônomos.

### **2.2.6. Técnicas e Estratégias de Carregamento**

Diversas estratégias de carregamento foram exploradas nos estudos. [Lavety et al. 2019] propôs uma estratégia de carregamento de corrente constante multi-etapa para baterias VRLA. [Lin et al. 2016] apresentou um sistema de carregamento de bateria eficiente baseado em uma estratégia ideal de múltiplos estados. Enquanto isso, [Belarbi et al. 2019] discutiu os limites operacionais dos controladores de carga da bateria, e [Yoomak et al. 2018] projetou um carregador solar que desafia vários níveis de irradiância solar e temperatura para armazenamento de energia.

### **2.2.7. Aplicações e Contextos de Pesquisa**

A diversidade de aplicações e contextos de pesquisa em gestão de baterias é evidente nos estudos revisados. [Chmielewski et al. 2018] investigaram a aplicação de baterias em sistemas de armazenamento de energia renovável, enquanto [Alvarez Anton et al. 2013] focaram em sistemas de backup de energia para infraestruturas críticas. Além disso, [Huang et al. 2010] e [Akbar et al. 2016] exploraram a integração de baterias em micro-redes e sistemas de geração de energia distribuída, respectivamente.

### 2.2.8. Estratégias Avançadas de Carregamento

Além das estratégias tradicionais de carregamento, novas abordagens estão sendo exploradas para melhorar a eficiência e a vida útil das baterias. [Lavety et al. 2019] introduziu uma estratégia de carregamento adaptativo baseada em feedback para baterias de íon-lítio. [Lin et al. 2016] propôs um método de carregamento rápido que minimiza o estresse térmico na bateria. [Belarbi et al. 2019] e [Yoomak et al. 2018] discutiram estratégias de carregamento otimizadas para baterias em sistemas solares fotovoltaicos.

### 2.3. Conclusões da Revisão

A gestão eficiente de baterias é fundamental para otimizar a integração de fontes de energia renovável, como painéis solares, em sistemas de armazenamento de energia. Este estudo revisou extensivamente a literatura sobre gestão de baterias, modelagem, simulação e estratégias avançadas de carregamento. Com base nessa revisão, podemos extrair insights cruciais para o projeto em questão, que visa desenvolver um controlador PWM usando MOSFET para uma bateria de chumbo ácido estacionária de 15V com um painel solar de 20W.

**Estratégias de Carregamento:** Como destacado por [Lavety et al. 2019], a implementação de estratégias de carregamento adaptativo pode ser crucial para maximizar a eficiência do carregamento da bateria de chumbo ácido, especialmente quando alimentada por um painel solar de 20W. Considerando as variações na geração de energia solar, um carregamento adaptativo pode ajustar dinamicamente a taxa de carregamento para garantir a saúde da bateria.

**Monitoramento e Feedback:** A integração de sistemas de monitoramento, como proposto por [Lin et al. 2016], pode ser benéfica para o projeto. Monitorar a temperatura e outros parâmetros vitais da bateria pode ajudar a prevenir situações de estresse térmico e prolongar a vida útil da bateria. onfigurações do controlador PWM para otimizar o desempenho da bateria.

**Integração com Painel Solar:** O trabalho de [Belarbi et al. 2019] e [Yoomak et al. 2018] sobre estratégias de carregamento para baterias em sistemas solares fotovoltaicos é particularmente relevante. A implementação de algoritmos que considerem a variação na geração de energia solar pode ajudar a otimizar o carregamento da bateria e garantir uma operação eficiente.

**Considerações Finais:** O projeto proposto é uma combinação de hardware e software que visa otimizar o armazenamento e a utilização de energia solar. Com base na literatura revisada, é evidente que a combinação de estratégias avançadas de carregamento, monitoramento em tempo real e comunicação eficiente via MQTT pode levar a um sistema robusto e eficiente. Recomenda-se também a realização de testes extensivos em condições variadas para validar e refinar o sistema proposto.

## 3. Desenvolvimento do Projeto

Nesta seção, apresentaremos a descrição funcional e o diagrama de alto nível do sistema, detalhando a estrutura e os requisitos fundamentais do projeto. Em seguida, exploraremos a lógica de controle e comunicação do ESP, e por fim, o design e a navegabilidade do aplicativo móvel e suas telas, oferecendo uma visão da interface do usuário.

### 3.1. Descrição Funcional

A descrição funcional tem o objetivo de descrever todas as características e restrições do projeto. Essa descrição é comumente dividida em requisitos funcionais, requisitos não funcionais e regras de negócio.

#### 3.1.1. Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais descrevem as funções específicas que um sistema deve ter. Eles definem o que o sistema deve fazer do ponto de vista do usuário ou de outros componentes do sistema. Geralmente, os requisitos funcionais são expressos em termos de ações ou operações que o sistema deve realizar, bem como em termos de entradas e saídas esperadas. São requisitos funcionais do projeto Sunchaser:

##### 1. Medição de Corrente e Tensão:

- O sistema deve medir a corrente entre o painel solar e a bateria, e entre a bateria e a carga usando sensores INA219.
- Deve medir as tensões do painel e da bateria.
- Os sensores INA219 devem ser calibrados através de uma média de dez medições para minimizar o ruído.
- O ESP32 deve monitorar as medições de tensão e corrente.

##### 2. Controle de Carga:

- O sistema deve controlar a carga de uma bateria de chumbo-ácido de 12V usando um painel solar e um ESP32.
- A carga deve ser controlada via PWM utilizando um MOSFET IRF9640.
- O sistema deve ter a capacidade de ligar/desligar a carga através de um relé.
- O ESP32 deve abrir o relé para interromper o uso da bateria pela carga caso a corrente entre a bateria e a carga atingir ou exceder 1.1A.

##### 3. Segurança e Precisão:

- O sistema deve garantir a precisão das medições de tensão através de divisores de tensão.
- Diodos zener devem ser utilizados para proteger o ESP32 contra sobretensões.

##### 4. Gerenciamento de Dados:

- O ESP32 deve armazenar dados de medição em uma memória cache antes de enviá-los para o broker.
- Os dados do cache devem ser transferidos para a memória de longo prazo após o envio, e o cache deve ser limpo.

##### 5. Aplicativo Móvel:

- **Tela Sem Conexão:** Exibida quando o ponto de acesso ao servidor do ESP está desconectado, com um botão para tentar a conexão.
- **Tela Home:** Exibida quando conectado, permite aos usuários ver os valores da última medição, solicitar uma nova medição e acessar outras opções.
- **Tela de Gráficos:** Acessível através da barra de opções, permite visualizar diferentes medidas.

- **Tela de Configurações:** Permite aos usuários ajustar o intervalo entre as medições, o intervalo entre os envios ao servidor e o tempo de dados armazenados na memória de longo prazo.

#### 6. **Integração e Compatibilidade:**

- O sistema deve ser integrado ao sistema existente do pluviômetro e ao broker MQTT já estabelecido.
- Deve aderir aos protocolos de comunicação preestabelecidos para garantir compatibilidade e interoperabilidade.

#### 7. **Gestão de Conectividade:**

- O WiFi e o Ponto de Acesso ao servidor do ESP devem permanecer desligados até que sejam necessários.
- O WiFi deve ser ativado de acordo com o intervalo estabelecido para as tentativas de envio ao servidor.
- O ponto de acesso ao servidor do ESP deve ser ativado apenas quando um interruptor físico na placa for acionado, gerando uma interrupção no ESP32 e colocando-o no loop de comunicação do ponto de acesso ao servidor do ESP.
- O Ponto de Acesso ao servidor do ESP deve ser desligado quando a chave estiver desligada.

### 3.1.2. **Requisitos Não Funcionais**

Os requisitos não funcionais descrevem as características do sistema que afetam a qualidade, o desempenho, a segurança e outros aspectos do sistema que não estão diretamente relacionadas às funções específicas. Estes requisitos se concentram em qualidades do sistema, como escalabilidade, disponibilidade, usabilidade, desempenho, segurança e confiabilidade. Os requisitos não funcionais podem ser mais difíceis de medir e testar do que os requisitos funcionais, pois muitas vezes envolvem critérios subjetivos. São requisitos não funcionais do projeto Sunchaser:

#### 1. **Hardware:**

- A placa de circuito impresso personalizada deve ser de dupla face e feita de fenolite.
- Trilhas de 60th para ser possível fazer PCBs com o método de transferência térmica sem erros e para que elas não descolem da placa de fenolite ao serem soldadas.

#### 2. **Operacional:**

- O sistema **não** possui mecanismos específicos para lidar com variações extremas de temperatura ou interferências eletromagnéticas externas.
- Está destinado a operar em áreas remotas e deve ser alojado em uma caixa protetora contra os elementos.

#### 3. **Manutenção e Atualizações:**

- O sistema **não** requer gestão específica do desgaste da memória flash.
- As atualizações de software, se necessárias, devem ser realizadas manualmente.

#### 4. **Segurança:**



- Deve utilizar lógicas booleanas integradas para alertar os usuários sobre possíveis problemas ou falhas.
- O layout da placa deve ser projetado para minimizar a interferência no ESP32 causada pelo chaveamento PWM do circuito de potência.

#### 5. **Desempenho:**

- O sistema deve garantir a eficiência energética e a segurança operacional.
- O ESP32 é responsável por garantir que a bateria nunca atinja um nível criticamente baixo e por administrar o carregamento seguro e eficiente da bateria.

### 3.1.3. Regras de Negócio

Regras de negócio são diretrizes que estabelecem os procedimentos e as restrições que governam as operações e o comportamento de um sistema. Elas desempenham um papel fundamental na definição de como um sistema opera e interage com outros sistemas. As regras de negócio orientam como o software deve funcionar e interagir com os usuários e outros sistemas. São regras de negócio do projeto Sunchaser:

#### 1. **Controle de Energia:**

- A energia do painel solar só deve ser usada para carregar a bateria quando a condição de carga for adequada, conforme determinado pelo ESP32.
- O sistema deve colocar o carregamento em estado de **Flutuação** para evitar sobrecarga.

#### 2. **Medições:**

- As medições de corrente e tensão devem ser realizadas em intervalos específicos, conforme configurado no aplicativo móvel.
- As medições devem ser calibradas para garantir precisão e minimizar o ruído.

#### 3. **Conectividade:**

- O WiFi deve ser ativado apenas durante os períodos de envio de dados ao servidor, conforme configurado no aplicativo móvel.
- O ponto de acesso ao servidor do ESP só pode ser ativado por meio de um interruptor físico na placa e deve ser desativado quando o interruptor estiver desligado.
- O sistema deve ser compatível com o sistema existente do pluviômetro e o broker MQTT, aderindo aos protocolos de comunicação preestabelecidos.

#### 4. **Aplicativo Móvel:**

- O aplicativo móvel deve permitir aos usuários visualizar dados de medição e configurar intervalos de medição e envio de dados
- O aplicativo só pode se conectar ao ESP32 via ponto de acesso ao servidor do ESP quando o interruptor físico na placa estiver ativado.

#### 5. **Segurança:**

- Mecanismos de segurança, como diodos zener e divisores de tensão, devem ser implementados para proteger o ESP32 e outros componentes sensíveis de sobretensões.

#### 6. **Armazenamento de Dados:**

- Os dados de medição devem ser armazenados temporariamente em um cache antes de serem enviados ao broker MQTT.
- Após o envio, os dados devem ser transferidos para a memória de longo prazo no ESP32.

### 3.2. Diagrama de Alto Nível do Sistema

A Figura 2 ilustra o Diagrama de Alto Nível do Sistema, proporcionando uma visão simplificada da arquitetura integrada do projeto em desenvolvimento e do projeto do pluviômetro existente. Neste diagrama, os componentes em **roxo** representam as partes que estão sendo desenvolvidas neste projeto, focadas no ESP, na placa de controle e no aplicativo mobile. Eles são responsáveis pelo gerenciamento e controle eficiente da energia, garantindo operação otimizada e segura. **Os elementos em cinza, por outro lado, são componentes já existentes do projeto do pluviômetro**, incluindo o broker, o servidor e o site, que facilitam a comunicação e o armazenamento de dados.

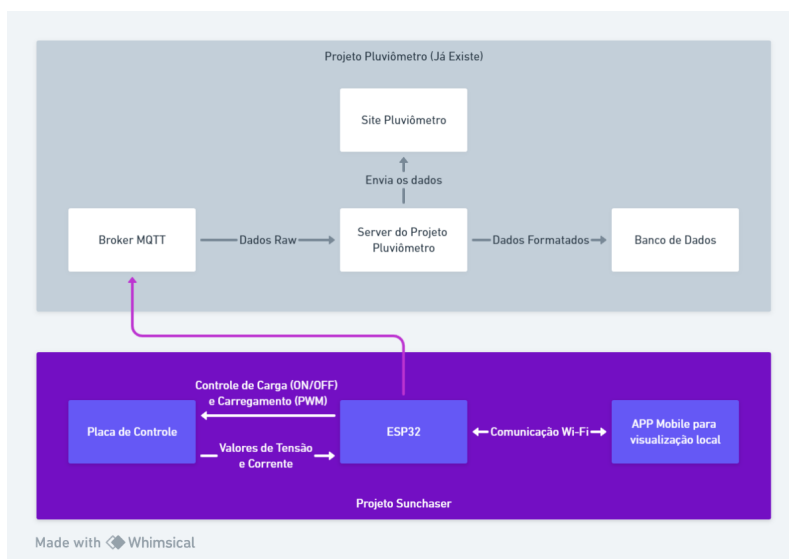


Figura 2. Diagrama do Sistema de Alto Nível

### 3.3. Funcionamento e Diagramas do programa do ESP

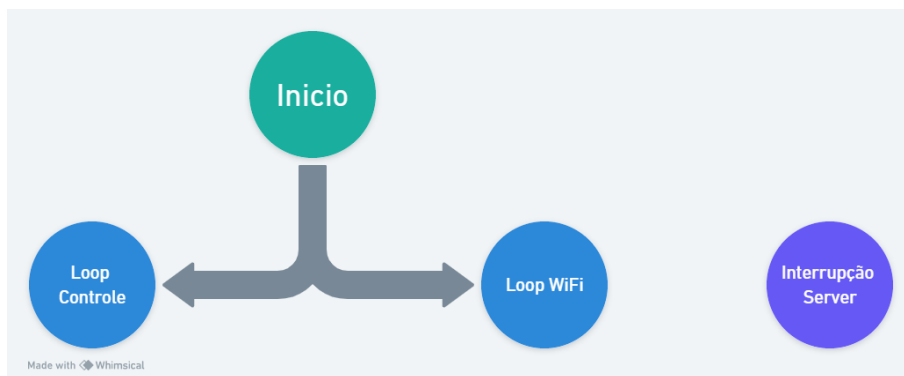
A lógica de controle e comunicação do ESP é detalhadamente ilustrada através de uma série de fluxogramas, cada um destacando um aspecto específico do funcionamento interno do ESP.

Na Figura 3, é apresentada a estrutura principal do programa do ESP. O ESP opera em dois loops principais simultâneos: o loop de controle e o loop de WiFi, além de uma interrupção ativada fisicamente, que gera o ponto de acesso (AP) ao servidor do ESP.

A Figura 4 detalha o loop de controle. Este loop inicia requisitando uma medição, processa os dados coletados para ajustar o PWM conforme os estados de carga da bateria e, em seguida, altera o duty cycle do PWM antes de requisitar a próxima medição, respeitando o intervalo de tempo definido no aplicativo.

Esse controle é feito por software através da classe **BatteryControl**, que realiza o controle de carregamento da bateria através dos seguintes métodos:

**PWM\_init()** é responsável por inicializar o PWM (Pulse Width Modulation) para controlar a tensão de carga da bateria. Ele configura o pino *S2\_Pin*, o qual é o pino que controla o relé que conecta a carga, como saída e configura as funcionalidades do PWM



**Figura 3. Fluxograma Principal do ESP**

usando a função *ledcSetup()*. Em seguida, o canal PWM é anexado ao pino *PWM\_Pin* usando a função *ledcAttachPin()*.

**changeDutyCycle()** é responsável por alterar o ciclo de trabalho do sinal PWM. Ele verifica se o ciclo de trabalho está acima de 255 e o limita para 255. Da mesma forma, se o ciclo de trabalho estiver abaixo de 0, ele é limitado para 1. Em seguida, o método usa a função *ledcWrite()* para definir o ciclo de trabalho do canal PWM.

**check\_error()** é responsável por verificar o erro entre a tensão da bateria e um valor de referência. Se o erro for maior que 0, o ciclo de trabalho é diminuído em 1 para reduzir a tensão de carga. Se o erro for menor que 0, o ciclo de trabalho é aumentado em 1 para aumentar a tensão de carga.

**bulk\_stage()** é responsável por definir o ciclo de trabalho como 255, que representa a fase de carga em massa da bateria. Ele chama o método *changeDutyCycle()* para atualizar o ciclo de trabalho.

**absorption\_stage()** é responsável por manter a tensão da bateria com um valor de referência chamado AV (Absorption Voltage: 12 V) durante a fase de absorção. Ele calcula o erro entre a tensão da bateria e AV, chama o método *check\_error()* para ajustar o ciclo de trabalho e, em seguida, chama o método *changeDutyCycle()* para atualizar o ciclo de trabalho.

**float\_stage()** é responsável por manter a tensão da bateria no nível de tensão de flutuação *FV* (Float Voltage: 10V) durante a fase de flutuação. Ele calcula o erro entre a tensão da bateria e *FV*, chama o método *check\_error()* para ajustar o ciclo de trabalho e, em seguida, chama o método *changeDutyCycle()* para atualizar o ciclo de trabalho. Contudo, como o datasheet da Bateria que utilizamos não possui indicação do uso de uma tensão de Flutuação, seguimos as recomendações do Fabricante e mantivemos a Tensão na bateria na Absorption Voltage de 12V.

**charging\_control()** é responsável por controlar o processo de carga da bateria. Ele lê a corrente da bateria e a tensão da bateria usando o objeto *read\_sensors* da classe *Sensors*. Em seguida, ele verifica as condições para determinar em qual fase de carga a bateria está e chama os métodos correspondentes (*bulk\_stage()*, *absorption\_stage()*, *float\_stage()*) para ajustar o ciclo de trabalho do PWM.

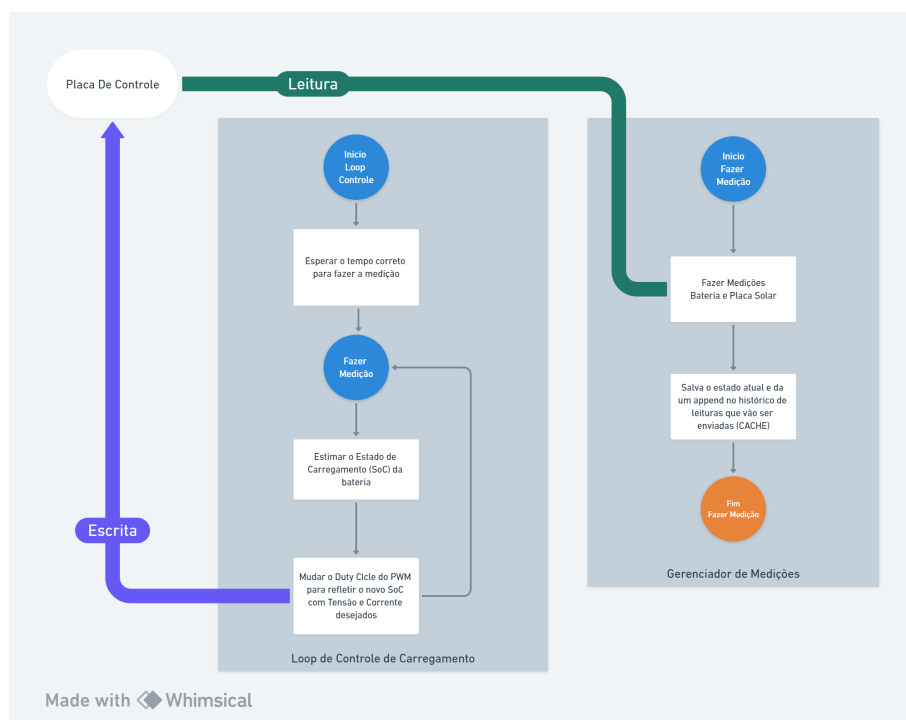
A função **load\_connection()** é responsável por controlar a conexão da carga com

a bateria, verificando a tensão e a corrente por meio do objeto *read\_sensors*. Ela decide sobre a desconexão ou reconexão da carga com base em duas condições específicas: a função desconecta a carga se a tensão da bateria for inferior à tensão mínima de descarga de 9V, conforme especificado pelo fabricante, ou se a corrente exceder o limite máximo de 1.1A. Esse controle é realizado através da atuação no pino *S2\_Pin*.

**battery\_loop()** é responsável por executar o loop principal do controle da bateria. Ele verifica se o processo de carga já foi iniciado. Se não, ele define o ciclo de trabalho como 255 para a fase de carga em massa. Em seguida, ele chama os métodos *charging\_control()* e *load\_connection()* para controlar o processo de carga e a conexão da carga, respectivamente.

**stopCharging()** é responsável por interromper o processo de carga da bateria. Ele define o ciclo de trabalho como 0 para desligar completamente o PWM.

O código de funcionamento completo pode ser visto na página do GitHub<sup>1</sup> do projeto, assim como todas as outras funcionalidades do sistema criado.

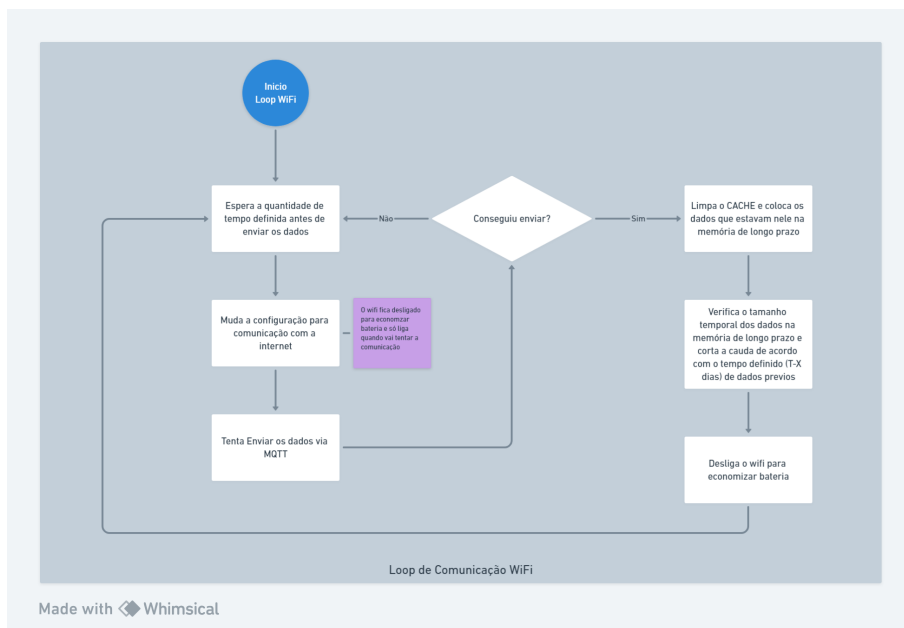


**Figura 4. Fluxograma do Loop de Controle do ESP**

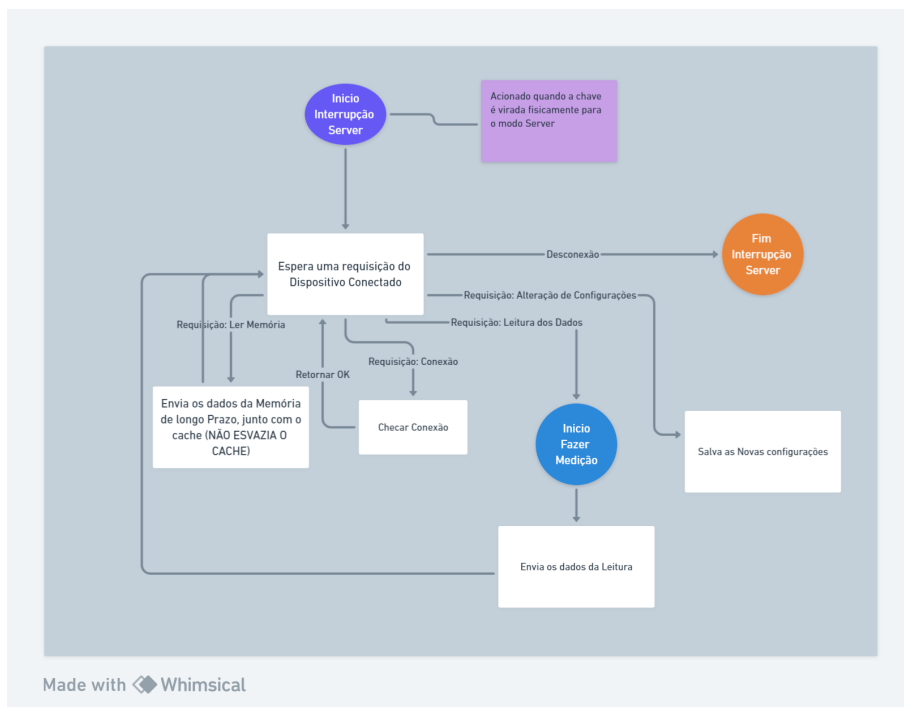
O loop de WiFi, como mostrado na Figura 5, é responsável pela comunicação com o broker. Ele aguarda o tempo definido, tenta enviar os dados armazenados no cache para o broker e, se bem-sucedido, move os dados para a memória de longo prazo e limpa o cache.

A interrupção para o AP do servidor do ESP é detalhada na Figura 6. Quando ativada, o ESP entra em um loop onde aguarda requisições do aplicativo móvel, podendo enviar dados, realizar medições manuais ou alterar configurações. As rotas da API REST no Access Point do ESP32 pode ser vista na **Tabela 1**

<sup>1</sup>[https://github.com/TarefasUFSC/Sunchaser-Solar\\_Charging\\_System](https://github.com/TarefasUFSC/Sunchaser-Solar_Charging_System)



**Figura 5. Fluxograma do Loop de WiFi do ESP**



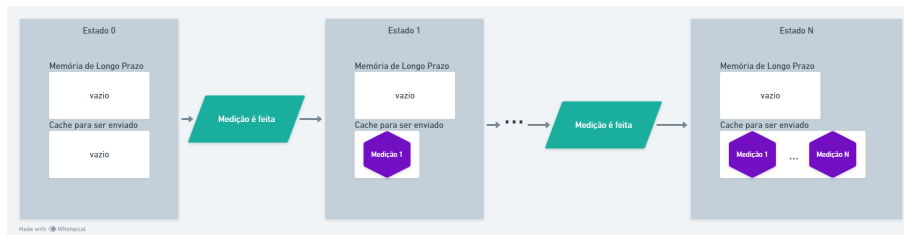
**Figura 6. Fluxograma da Interrupção para o AP do servidor do ESP**

<b>Tipo</b>	<b>Rota</b>	<b>Query Params</b>	<b>Body</b>	<b>Retorno</b>	<b>Observações</b>
GET	/cache	page: Numeric	-	JSON: Lista de leituras do cache, total de itens, itens por página (10)	Máximo de 10 itens por página
GET	/ltm	page: Numeric	-	JSON: Lista de leituras da memória, total de itens, itens por página (10)	Máximo de 10 itens por página
POST	/reading	-	-	JSON: Novas medições	-
POST	/settings	-	JSON: Novas configurações	-	O app verifica o sucesso pela resposta do status code
GET	/settings	-	-	JSON: Configurações atuais	-
GET	/check	-	-	String: "conectado!"	Utilizado para verificar a conexão com o ESP

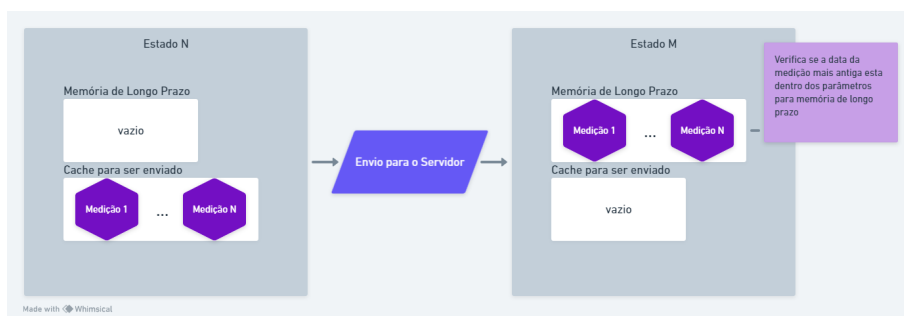
**Tabela 1. Descrição das Operações e Rotas**

### 3.3.1. Gestão da Memória do ESP

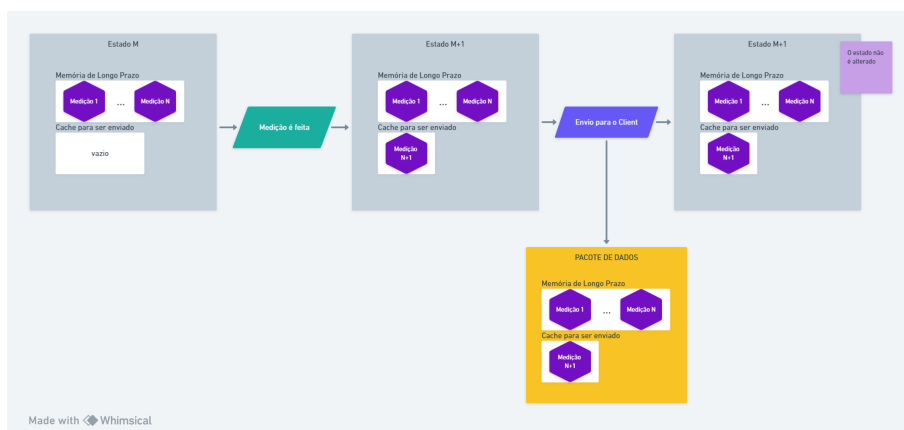
A gestão da memória do ESP é ilustrada em um conjunto adicional de diagramas. A Figura 7 mostra o preenchimento do cache durante as medições. A Figura 8 ilustra a transferência de dados do cache para a memória de longo prazo durante o envio bem-sucedido ao broker. A Figura 9 destaca que as operações ao servidor do ESP não afetam o cache ou a memória de longo prazo, mas podem acessar e transmitir os dados armazenados.



**Figura 7. Diagrama da Memória do ESP durante as Medições**



**Figura 8. Diagrama da Memória do ESP durante o Envio ao Servidor**



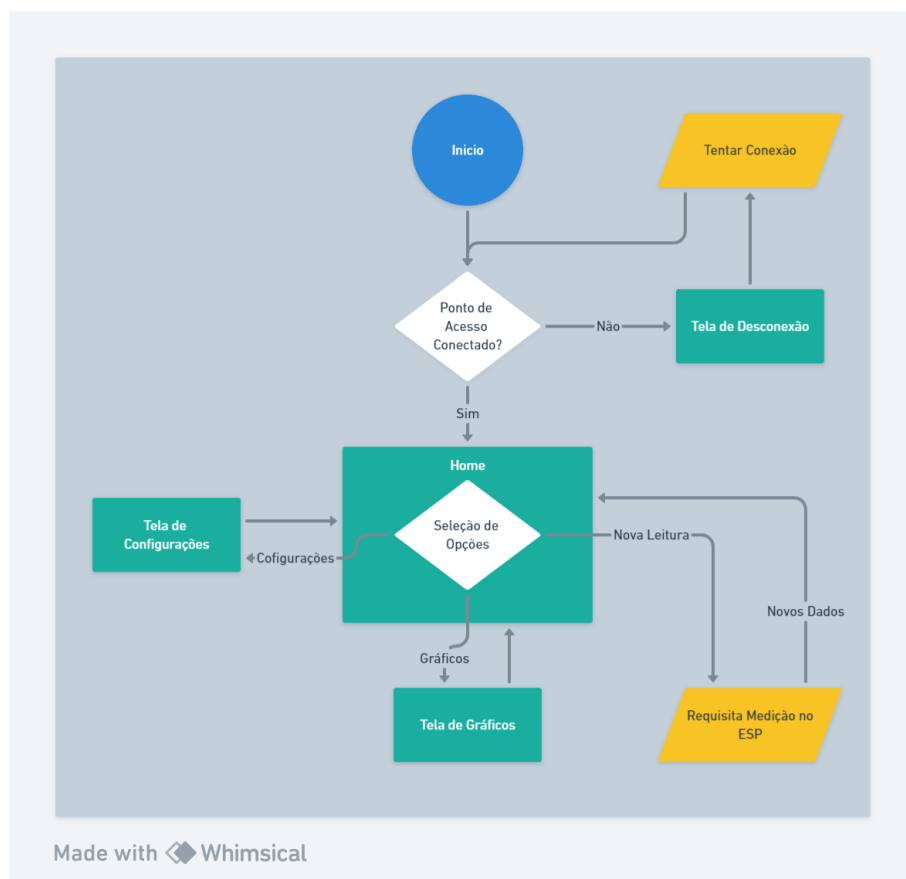
**Figura 9. Diagrama da Memória do ESP durante a Comunicação com o servidor do ESP**

### 3.4. Funcionamento e Diagramas do Aplicativo Mobile

O aplicativo móvel, cujo fluxograma de navegação é mostrado na Figura 10, é projetado para oferecer acesso local aos dados de carregamento através de um ponto de acesso ao



servidor gerado localmente no ESP. A primeira tela solicita ao usuário que estabeleça uma conexão com o servidor do ESP. Uma vez conectado, o usuário é levado para a tela inicial, onde pode navegar para outras seções do aplicativo que oferecem insights detalhados e visualizações gráficas dos dados de carregamento.



**Figura 10. Fluxograma de Navegação no Aplicativo Mobile**

### 3.4.1. Design Final das Telas do Aplicativo Mobile

As Figuras 11 a 14 mostram o design final das telas do aplicativo móvel. A Tela 1 é a interface inicial onde os usuários são solicitados a conectar o aplicativo ao ESP. Uma vez estabelecida a conexão, os usuários são direcionados para a Tela 2, a tela inicial, que oferece uma visão geral das leituras mais recentes e opções para navegar para outras seções do aplicativo.

A Tela 3 apresenta gráficos detalhados das leituras de carregamento. Os usuários podem selecionar diferentes métricas através de um menu dropdown para visualizar gráficos específicos. A navegabilidade entre as telas é facilitada por uma barra de menu na parte inferior, permitindo aos usuários alternar facilmente entre as diferentes seções do aplicativo.



### 3.5. Desenvolvimento da Placa de Controle

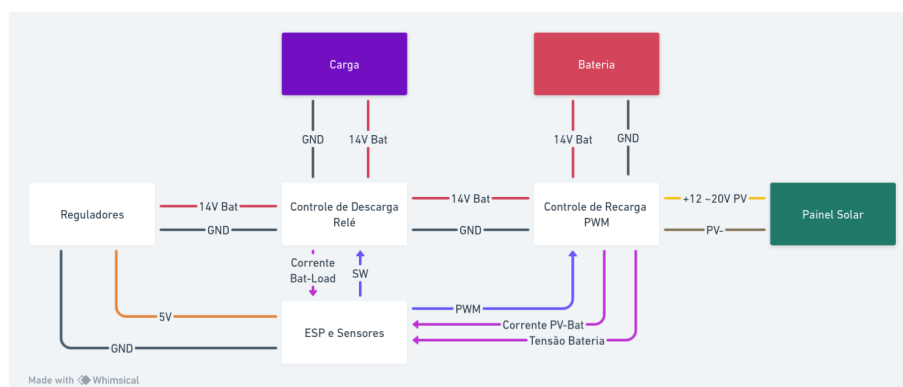
A placa de controle foi desenvolvida utilizando **Proteus 8.9**, com o intuito de facilitar a implementação prática do projeto. Esta placa engloba todos os circuitos e componentes necessários para atingir os objetivos do projeto. Ela se conecta ao **Painel Solar** e à **Bateria**, incluindo também um conector para uma **Saída para Carga de Alta Potência**, controlada por um switch.

O circuito é responsável por regular o carregamento da bateria a partir da energia solar, utilizando um PWM controlado por um **MOSFET Canal-P IRF9640**. Além disso, gerencia o uso da bateria na carga, através de um relé, que se abre quando a tensão na bateria está muito baixa (**LDV** no código) ou quando a corrente excede o limite seguro para a bateria (**LDC** no código).

Inicialmente, o circuito completo, incluindo as conexões para o ESP, os INA's, reguladores e controles de potência, foi implementado em uma única placa de fenolite de dupla face, produzida na UFSC de Florianópolis. Contudo, enfrentamos problemas durante os testes, cujas causas não foram identificadas. Isso nos levou a optar pela divisão do circuito em placas modulares, com objetivos específicos, facilitando assim a identificação e correção de erros. A divisão modular está ilustrada no diagrama da figura 16.

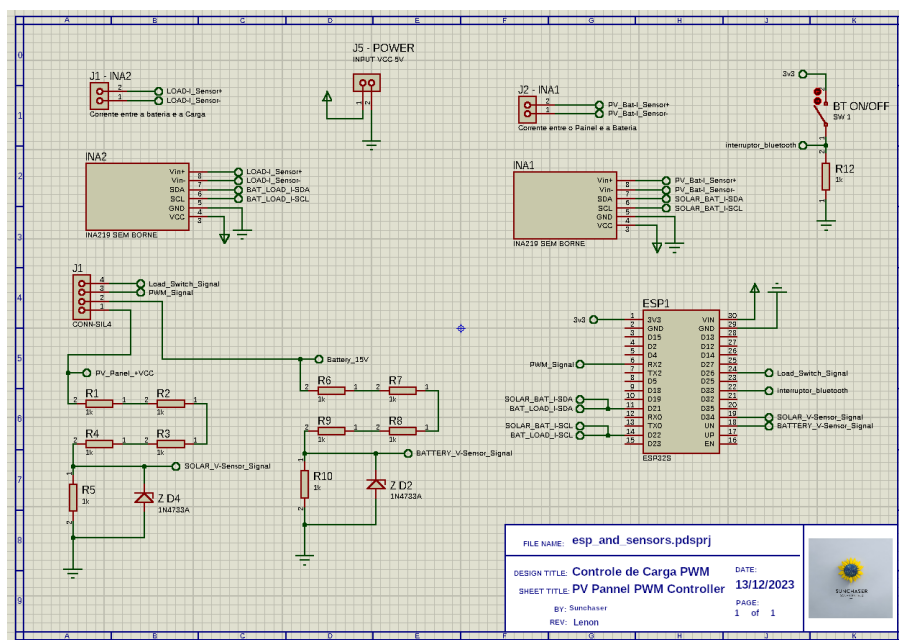
As placas desenvolvidas incluem:

- Placa do ESP e Sensores (**Figura 17**): A placa principal, contendo dois INA219 para medir as correntes entre o Painel Solar e a Bateria, e entre a Bateria e a Carga. Esta placa controla a Placa de Controle de Descarga e Carregamento.
- Placa de Controle de Carregamento PWM (**Figura 18**): Possui conexões para o Painel Solar e para a Bateria, além de uma conexão para o INA219 localizado na **Placa do ESP e Sensores**.
- Placa de Controle de Descarga com Relé (**Figura 19**): Conecta-se à Bateria e à carga, controlando a abertura ou fechamento desta conexão, conforme a tensão e a corrente adequadas para a bateria. Dispõe também de uma saída de tensão da bateria para a placa de Reguladores e uma saída para conectar o INA219 da **Placa do ESP e Sensores**.
- Placa de Reguladores de Tensão (**Figura 20**): Recebe a tensão da Bateria, fornecendo tensão estável de 5V, 9V e 12V.



**Figura 16. Diagrama da Divisão das Placas de Forma Modular**

### 3.5.1. Placa do ESP e Sensores



**Figura 17. Circuito no Proteus da Placa do ESP e Sensores**

A **Figura 17** ilustra o circuito da Placa do ESP e Sensores no Proteus. Esta placa é essencial para a conexão dos sensores INA219, configurados nos endereços `0x40` e `0x41`. Ela também inclui divisores de tensão, protegidos por diodos Zener, garantindo que o ESP leia as tensões da bateria e do painel solar de forma segura. Outro componente importante nesta placa é a chave que alterna o comportamento do ESP entre Cliente e Servidor WiFi.

A implementação desta placa foi crucial para o diagnóstico de dois problemas específicos. Primeiramente, observamos que o uso do pino 33 para interrupção, que faz parte do ADC1, interferia nas leituras do painel solar e da bateria. Isso ocorria porque o circuito de pulldown aplicava 5V ao pino 33, prejudicando as leituras analógicas do Conversor Analógico Digital do ESP. Além disso, constatamos que, ao empregar a biblioteca *WiFi.h* do ESP32, torna-se **impossível** a utilização de qualquer pino do ADC2.

A **Tabela 2** detalha os pinos utilizados no ESP:

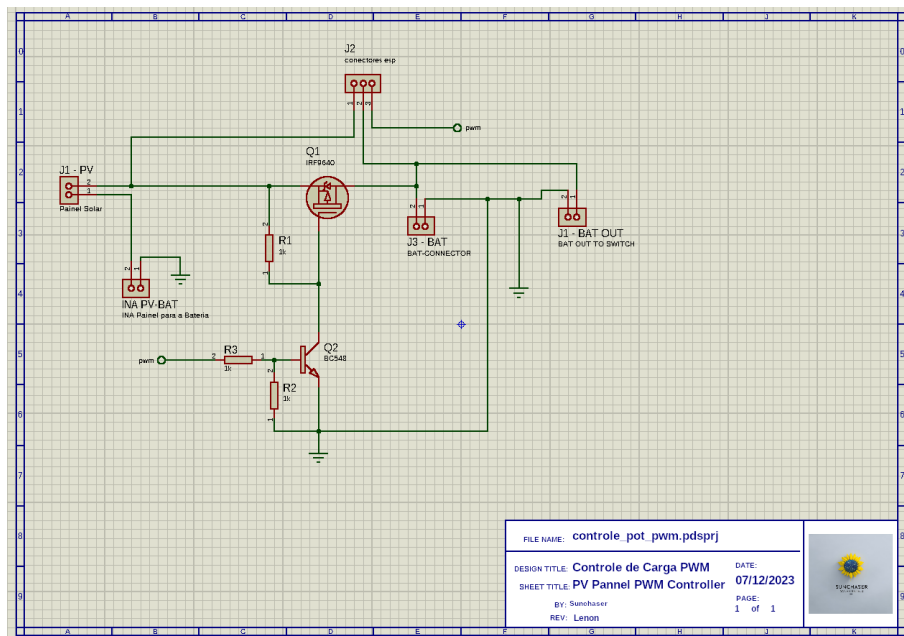
### 3.6. Placa de Controle de Carregamento PWM

O circuito de controle de carregamento PWM é detalhadamente representado na **Figura 18**. Este utiliza um MOSFET Canal-P, especificamente o modelo **IRF9640**, para gerir o controle PWM da corrente entre o Painel Solar e a Bateria. A escolha do Canal P é estratégica, visto que o Projeto SUNCHASER adota um sistema de controle PWM em série para o carregamento. Como o circuito apresenta duas fontes de tensão, apenas um MOSFET do tipo Canal P pode efetivamente gerir a corrente em série. Isso se deve ao fato de que o MOSFET Canal-N exige que o seu terminal Source esteja conectado ao Ground, o que, neste caso, resultaria em um curto-circuito.

Além disso, o comportamento do Gate do MOSFET é tal que ele se torna condutor ("abre") quando a tensão entre o Gate e o Source é 0V, e se torna não-condutor

Pino (Nome no Código)	Número do Pino GPIO	Arquivo de Declaração	Observações
PWM_Pin	16	BatteryControl.h	Utilizado para controle PWM.
S2_Pin	26	BatteryControl.h	-
interrupt_pin	33	communicator.h	Não deve receber 5V para evitar problemas com ADC1.
Battery_Voltage_Pin	39	Sensors.h	Pino de leitura de tensão da bateria, deve estar no ADC1.
Solar_Voltage_Pin	34	Sensors.h	Pino de leitura de tensão do painel solar, deve estar no ADC1.
INA219_Sensor1_SCL	11	Obrigatório	SCL do primeiro sensor INA219.
INA219_Sensor1_SDA	10	Obrigatório	SDA do primeiro sensor INA219.
INA219_Sensor2_SCL	11	Obrigatório	SCL do segundo sensor INA219.
INA219_Sensor2_SDA	10	Obrigatório	SDA do segundo sensor INA219.

**Tabela 2. Pinagem do ESP no Projeto SUNCHASER**



**Figura 18. Circuito no Proteus da Placa de Controle de Carregamento PWM**

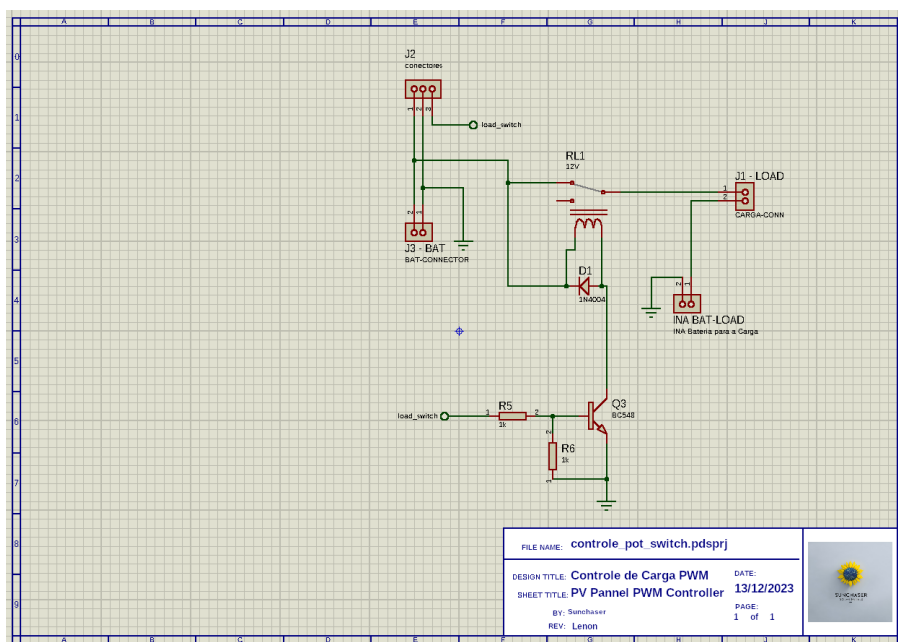
(“fecha”) com uma tensão de **-15V** (quinze volts negativos) entre o Gate e o Source. Essa característica é descrita pela equação:

$$V_g - V_s$$

Para adequar o sinal PWM gerado pelo ESP ao controle do MOSFET, foi implementado um circuito inversor utilizando um transistor **BC548**. Este circuito converte o sinal PWM de forma a controlar efetivamente o MOSFET.

Durante os testes desta placa, identificou-se uma peculiaridade: o circuito não opera conforme o esperado quando o dispositivo conectado ao terminal da Bateria não possui uma carga significativa. Exemplificando, uma bateria convencional, devido à sua capacidade de ser recarregada e de demandar corrente, apresenta uma resistência interna inerente. No entanto, ao substituir a bateria por uma fonte de bancada, que atua exclusivamente como um gerador de tensão e corrente sem consumir corrente do circuito, o comportamento do sistema se torna anormal. Para contornar essa situação, sempre que uma fonte de bancada for utilizada no lugar de uma bateria, é recomendável a inclusão de uma carga em paralelo com o circuito. No nosso caso, utilizamos um resistor de 1k5 ohm para esta finalidade.

### 3.6.1. Placa de Controle de Descarga com Relé

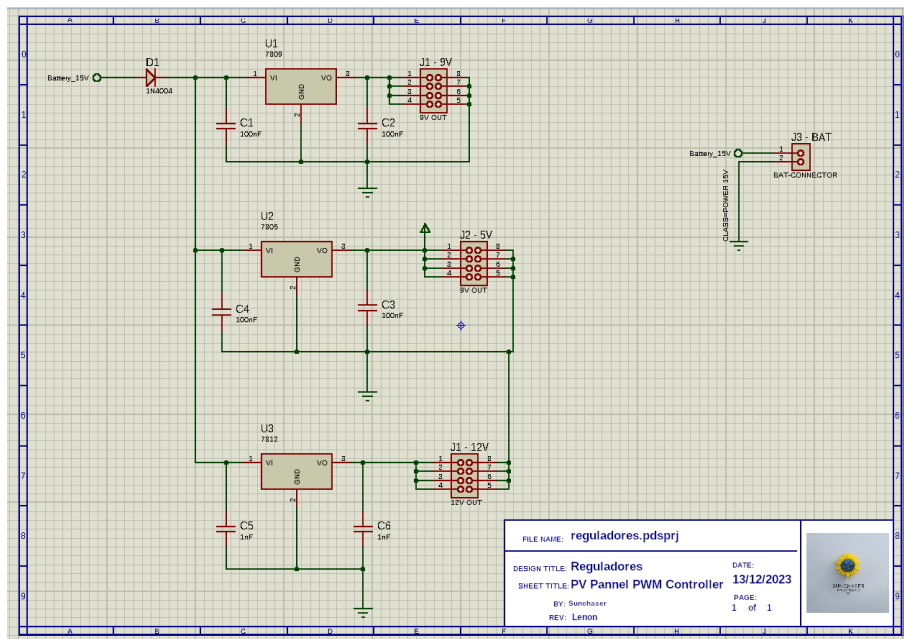


**Figura 19. Circuito no Proteus da Placa de Controle de Descarga**

O circuito de controle de descarga com relé é ilustrado na **Figura 19**. Este circuito incorpora um diodo 1N4004, cuja função é proteger contra a corrente reversa gerada pela transição de estados do solenoide do relé. Tal solenoide é capaz de gerar uma tensão transiente extremamente alta (teoricamente infinita) durante a mudança de estado, o que demanda a proteção mencionada.

### 3.6.2. Placa de Reguladores de Tensão

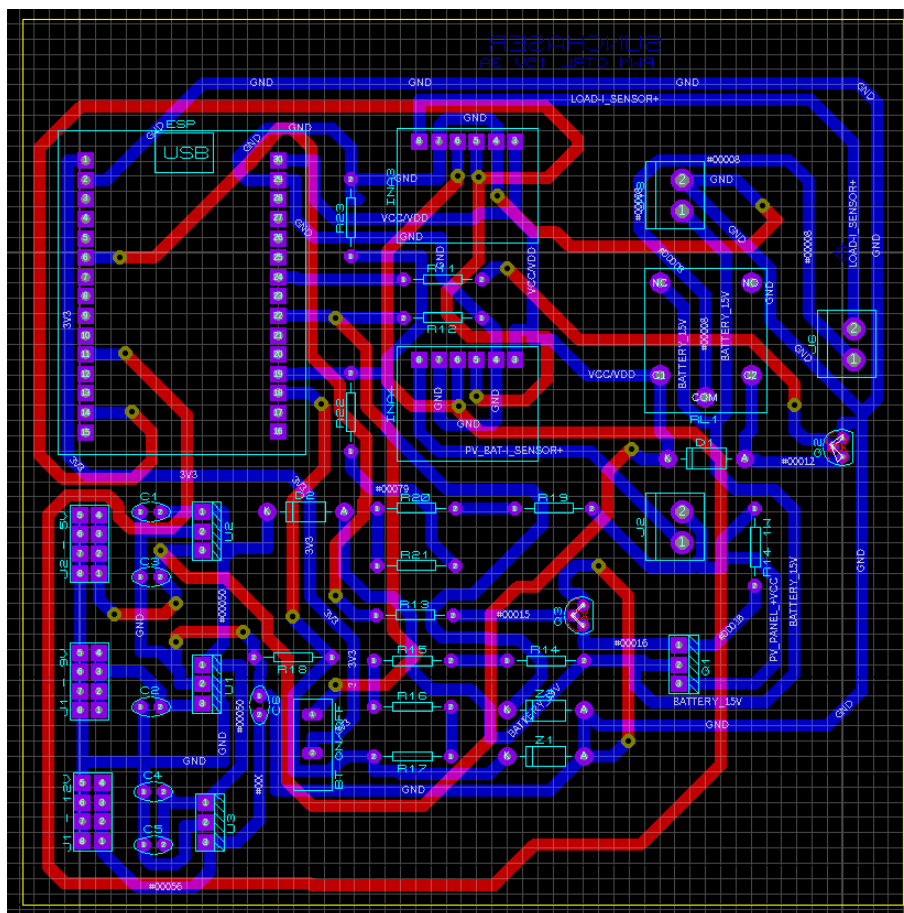
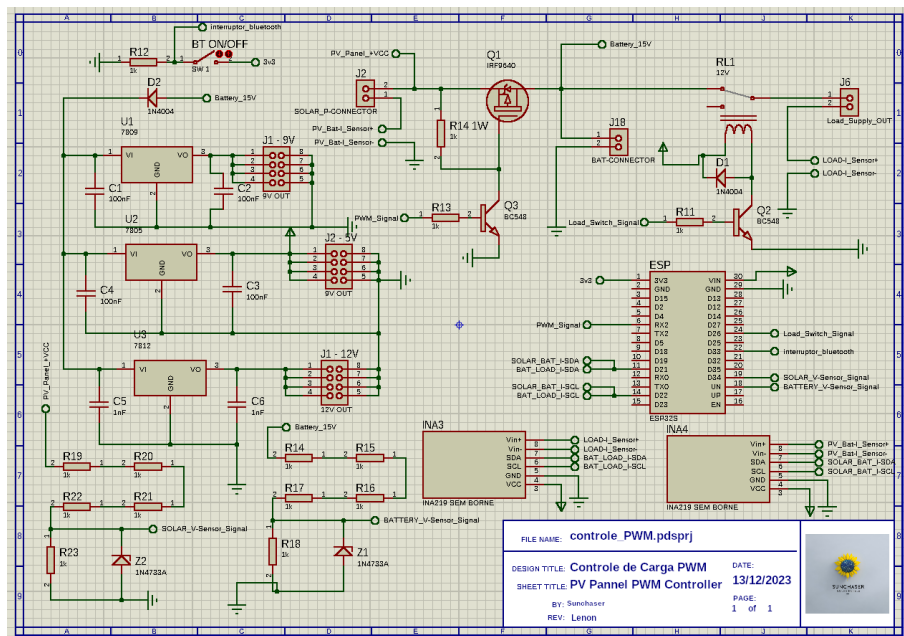
A Placa de Reguladores de Tensão, representada na **Figura 20**, emprega reguladores de tensão 7805, 7809 e 7812 para converter uma tensão de entrada superior a 12V nas tensões de saída de 5V, 9V e 12V. Além disso, a placa integra um diodo 1N4004 para prevenir a corrente reversa que pode ser gerada pelo ESP, especialmente quando este é alimentado simultaneamente por uma conexão USB e pelos 5V fornecidos por esta placa.



**Figura 20. Circuito no Proteus da Placa de Reguladores**

### 3.6.3. Unificação das Placas Modulares Com os Problemas Corrigidos

Após a conclusão dos testes em todas as placas modulares e a resolução de todos os problemas, procedemos à unificação dos circuitos em uma única placa. Devido à complexidade e ao tamanho significativamente maior desta placa unificada, tornou-se inviável a confecção em uma única camada de cobre, sendo necessário o uso de, no mínimo, duas camadas. O circuito completo desta placa unificada é apresentado na **Figura 21**, e o seu layout de Placa de Circuito Impresso (PCB) é exibido na **Figura 22**.





### 3.7. Desafios e Soluções

A adoção de uma estrutura modular no projeto de hardware, que segmenta as funções em módulos distintos (ESP com sensores, controle do PWM, controle da carga e reguladores de tensão), revelou-se uma estratégia eficaz na identificação e resolução de problemas. Esta abordagem permitiu testes isolados e a otimização de cada módulo individualmente. A análise detalhada de cada módulo conduziu a descobertas técnicas significativas:

- Identificou-se a importância de uma resistência interna na simulação da bateria para o comportamento adequado das tensões no circuito. A ausência dessa resistência foi contornada com a inclusão de um resistor em paralelo à fonte de alimentação durante os testes.
- Constatou-se que o uso do ADC1 é essencial para leituras analógicas, dado que o ADC2 torna-se inoperante quando o Wi-Fi do ESP32 está ativo.
- Observou-se que a aplicação de 5V em qualquer pino do ADC1 pode resultar em leituras incorretas nos outros pinos. Para mitigar esse problema, ajustou-se a tensão de pulldown da interrupção para 3.3V.

Inicialmente, o projeto visava estabelecer uma conexão entre o aplicativo e o ESP via *Bluetooth Low Energy* (BLE). No entanto, diante dos desafios encontrados na implementação dessa tecnologia, optou-se por estabelecer a comunicação entre o ESP e o aplicativo por meio de uma rede de internet. Neste cenário, o ESP atua como servidor e ponto de acesso, enquanto o aplicativo funciona como cliente.

Um aspecto adicional merece destaque no contexto da impressão de placas: trilhas com largura de 30 mils (milésimos de polegada) apresentam maior complexidade e sensibilidade durante o processo de soldagem em placas de fenolite. Essa característica exige especial atenção e experiência para assegurar uma conexão adequada, evitando o risco de as trilhas se soltarem e danificarem permanentemente a PCB. Assim, recomenda-se a fabricação de placas de circuito impresso com trilhas de no mínimo 40 mils, idealmente 60 mils, para prevenir danos durante a montagem. Adicionalmente, as trilhas de 30 mils foram produzidas com uma fresa industrial na UFSC de Florianópolis. Para PCBs confeccionadas pelo método de transferência térmica em placas de fenolite, recomenda-se trilhas com no mínimo 60 mils.

#### 4. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este relatório tem o objetivo de apresentar a proposta de desenvolvimento de um controle por modulação de largura de pulso (PWM), voltado para o eficiente gerenciamento da tensão e corrente em uma bateria de Chumbo-Ácido de 12V 5Ah. Para alcançar esse propósito, utilizou-se a combinação de um microcontrolador ESP32 com sensores INA219, responsáveis pela supervisão e controle dos processos. A equipe de desenvolvimento teve sucesso na concepção do sistema, composto por quatro placas distintas e um aplicativo móvel. Testes minuciosos foram realizados para verificar o desempenho do sistema, o qual se mostrou eficaz em diversas condições de teste.

No entanto, devido às restritas limitações temporais, a implementação **opcional** do sistema de alertas tornou-se impraticável, permanecendo como um tópico adequado para investigações futuras. Outros temas recomendados para análise subsequente incluem:

- **Incorporação de um Sistema Operacional para Paralelizar as Verificações:**  
Explorar a introdução de um sistema operacional com o propósito de realizar verificações de forma paralela, buscando uma otimização adicional do processo. Essa abordagem tem o potencial de aprimorar a eficiência do controle e monitoramento do sistema em diversas situações.
- **Inserção de um Cartão SD para Armazenamento de Dados:**  
Investigar a possibilidade de integrar um cartão SD para substituir o armazenamento em memória flash, proporcionando uma capacidade de armazenamento prolongada para os dados coletados. Essa medida visa atender às demandas de registro de informações em longo prazo de maneira mais eficiente.
- **Adição de Funcionalidades para Alteração de Configurações da Bateria:**  
Desenvolver e implementar funcionalidades que permitam a personalização das configurações da bateria, como a tensão de carga final, corrente máxima de descarga, tensão mínima de descarga e tensão de reconexão da carga. Essa flexibilidade proporcionaria uma adaptação mais específica às características da bateria em questão.

Essas considerações indicam direções promissoras para o aprimoramento futuro do sistema, ampliando sua funcionalidade e robustez diante das exigências operacionais e expectativas.

#### Referências

- [Akbar et al. 2016] Akbar, N., Islam, M., Ahmed, S., and Hye, A. (2016). Dynamic model of battery charging. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, 2016. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 4.
- [Alvarez Anton et al. 2013] Alvarez Anton, J., Garcia Nieto, P., Blanco Viejo, C., and Vilan Vilan, J. (2013). Support vector machines used to estimate the battery state of charge. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12):5919–5926. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 316 — RAYYAN-LABELS: to find out the difference between state of CHARGE and state of CHARGING.
- [Antonov et al. 2019] Antonov, I., Kanchev, H., and Hinov, N. (2019). Study of pwm solar charge controller operation modes in autonomous dc system. *2019 International Conference on High Technology for Sustainable Development, HiTech 2019*. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 4.

- [Belarbi et al. 2019] Belarbi, M., Kacher, A. D. E., and Hallouz, Z. (2019). Operating limits of battery charge controllers - 2019 8th international conference on renewable energy research and applications (icrera 2019). pages 749–754. International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Brasov, ROMANIA, NOV 03-06, 2019.
- [Chmielewski et al. 2018] Chmielewski, A., Mozaryn, J., Piórkowski, P., and Bogdziński, K. (2018). Comparison of narx and dual polarization models for estimation of the vrla battery charging/discharging dynamics in pulse cycle. *Energies*, 11(11). Export Date: 03 September 2023; Cited By: 3.
- [Dufo-Lopez et al. 2015] Dufo-Lopez, R., Artal-Sevil, J., Bernal-Agustin, J., and Dominguez-Navarro, J. (2015). Effect of the mppt and soc control of the charge controller in pv systems. *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2015*. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 2.
- [Faiz et al. 2021] Faiz, M., Kusumaningdyah, J., and Razak, F. (2021). Charging characteristics of solar panels with charging system using pulse width modulation control. *7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering: Technological Breakthrough for Greater New Life, ICEEIE 2021*. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 0.
- [Gies 2009] Gies, D. (2009). Safety of electrical equipment containing lead acid batteries. *2009 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering*, pages 1–7.
- [Huang et al. 2010] Huang, B., Hsu, P., Wu, M., and Ho, P. (2010). System dynamic model and charging control of lead-acid battery for stand-alone solar pv system. *Solar Energy*, 84(5):822–830. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 43.
- [Lavety et al. 2019] Lavety, S.,hya, Keshri, R. K., and Given, M. A. C. (2019). Multi-step constant current charging strategy for a valve regulated lead-acid battery - 2019 iee transportation electrification conference (itec-india). IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), Bengaluru, INDIA, DEC 17-19, 2019.
- [Lin et al. 2016] Lin, H. C., He, Y. J., and Liu, C. W. (2016). Design of an efficient battery charging system based on ideal multi-state strategy - 2016 international symposium on computer, consumer and control (is3c). pages 956–959. 3rd International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Natl Chin Yi Univ Technol, Xian, PEOPLES R CHINA, JUL 04-06, 2016.
- [Maithili et al. 2021] Maithili, P., Kavitha, R., Nithishkumar, R., Ganeshbharathi, T., Kannan, S. V., and Kumar, R. M. (2021). Intelligent battery management system. *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, pages 1–5.
- [Singh and Mishra 2013] Singh, R. and Mishra, S. (2013). A magnetically coupled feedback-clamped optimal bidirectional battery charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(2):422–432. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 69.
- [Teo et al. 2013] Teo, K. T. K., Goh, H. H., Chua, B. L., Tang, S. K., and Tan, M. K. (2013). Modelling and optimisation of stand alone power generation at rural area. *2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics - China*, pages 51–56. RAYYAN-LABELS: it's possible to learn about the SoC with fuzzy logic.
- [Victor et al. 2019] Victor, A., Mahato, D., Pundir, A., and Saxena, G. (2019). Design, simulation and comparative analysis of different types of solar charge controllers for optimized efficiency. *Proceedings - 2019 Women Institute of Technology Conference*

on *Electrical and Computer Engineering, WITCON ECE 2019*, pages 17–21. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 1.

[Wang et al. 2021] Wang, Y., Huang, F., Pan, B., Li, Y., and Liu, B. (2021). Augmented system model-based online collaborative determination of lead–acid battery states for energy management of vehicles. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 54(1):88–101. Export Date: 03 September 2023; Cited By: 4.

[Yoomak et al. 2018] Yoomak, S., Jettanasen, C., and Ngaopitakkul, A. (2018). Design of solar charger challenging various solar irradiance and temperature levels for energy storage. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE COMPUTING INFORMATION AND CONTROL*, 14(6):2071–2090.