

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TIAGO LUCAS KONDRA RODRIGUES**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA  
ATENDIMENTO DE UMA CARGA ESPECÍFICA**

**SÃO LEOPOLDO**

**2022**

**TIAGO LUCAS KONDRA RODRIGUES**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO PARA ATENDIMENTO DE UMA CARGA  
ESPECÍFICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
à Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS, como requisito necessário para  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.**

**Orientador:** Prof. Me. Samuel Lessinger

São Leopoldo, novembro de 2022

## RESUMO

Esse trabalho é baseado no estudo de uma microrrede isolada que está instalada no Laboratório de Energias Renováveis da Unisinos, no campus de São Leopoldo - RS. Essa microrrede tem a função de converter energia solar em energia elétrica, a energia gerada pelo sistema além de suprir a demanda da carga também deve recarregar as baterias da instalação, a estrutura que garante esse fluxo é basicamente composta por módulos fotovoltaicos, controlador de carga, inversor e um banco de baterias. Por tratar-se de um sistema isolado, ao operar fazendo uso apenas da energia contida em seu banco de armazenamento, a instalação deve garantir uma determinada autonomia a carga que a ela estiver conectada, pois a energia que os módulos fotovoltaicos recebem do sol pode variar, uma vez que as condições climáticas podem não ser favoráveis em alguns dias. A microrrede estudada, conta com uma estrutura de monitoramento que é responsável por toda a parte lógica de operação do sistema, essa estrutura lógica também fornece informações fundamentais que são exibidas em um supervisório em uma página web. O sistema possui 8 placas de 75 Wp que associadas podem gerar até 600 Wp de potência, com uma tensão de até 40 V na saída do painel fotovoltaico, além de um par de baterias de 60 Ah de capacidade, que são responsáveis pelo armazenamento da energia gerada. A pesquisa contida nesse trabalho, descreve de forma detalhada o desenvolvimento do projeto nas etapas de dimensionamento, instalação e elaboração do sistema supervisório e de aquisição de dados, a pesquisa também apresenta dois ensaios com cargas aplicadas ao banco de armazenamento, durante esses ensaios através da coleta de dados realizada pelo sistema de monitoramento foram verificados períodos de 290 min e 54 min de autonomia para cargas de 55 W e 250 W respectivamente, uma vez ligadas ao banco com 100% da sua capacidade de armazenamento e isolado do sistema de geração, dessa forma eliminando qualquer possibilidade de recarga. Os ensaios realizados também possibilitaram evidenciar a variação da eficiência do banco de armazenamento de acordo com a sua velocidade de descarga. Por fim, como objetivo principal através dos ensaios práticos define-se uma capacidade de armazenamento igual a 868,05 Ah, para que um banco de baterias seja capaz de garantir uma autonomia de 48 h a um refrigerador de 250 W de potência, sem que os módulos fotovoltaicos sejam expostos aos raios solares.

**Palavras-chave:** Sistemas fotovoltaicos, Energia solar, Sistemas Isolados, Geração de energia, Microrredes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de geração distribuída. . . . .	16
Figura 2 – Efeito da energia solar sobre um módulo fotovoltaico. . . . .	17
Figura 3 – Ângulo Zênite, inclinação do plano, superfície azimutal e ângulo solar azimutal para superfícies inclinadas. . . . .	18
Figura 4 – Piranômetro termoeletrico (A) e Piranômetro Fotovoltaico (B). . . . .	19
Figura 5 – Comparativo entre respostas espectrais dos diferentes tipos de piranômetros. 1 – Distribuição espectral da irradiância solar na superfície da Terra. 2 – Resposta do piranômetro termoeletrico. 3 – Resposta do piranômetro FV. . . . .	20
Figura 6 – Piranômetro Termoeletrico. . . . .	20
Figura 7 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica (efeito fotovoltaico). . . . .	21
Figura 8 – Painel de onze módulos fotovoltaicos instalados sobre um telhado. . . . .	22
Figura 9 – Associação de células em série. . . . .	22
Figura 10 – Associação de células em paralelo. . . . .	23
Figura 11 – Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada. . . . .	24
Figura 12 – Esquema de sistema interligado à rede elétrica. . . . .	25
Figura 13 – Exemplo de sistema híbrido. . . . .	26
Figura 14 – Modelo de uma bateria chumbo-ácido. . . . .	27
Figura 15 – Exemplo de um inversor instalado. . . . .	28
Figura 16 – Exemplo de controlador de carga com suas entradas e saídas. . . . .	29
Figura 17 – Quadro sinótico de um sistema SCADA. . . . .	31
Figura 18 – Topologia da microrrede fotovoltaica isolada. . . . .	32
Figura 19 – Painel fotovoltaico com 8 módulos monocristalinos. . . . .	33
Figura 20 – Inversor Senoidal Puro 1000 W/24 V. . . . .	34
Figura 21 – Controlador de carga MPPT - Trace/3215RN. . . . .	35
Figura 22 – Baterias do sistema. . . . .	36
Figura 23 – Topologia do sistema de aquisição de dados. . . . .	37
Figura 24 – Sensor de corrente ACS712. . . . .	38
Figura 25 – Sensor de tensão DC 0-25 V 2281. . . . .	39
Figura 26 – Placa Doit ESP32. . . . .	40
Figura 27 – Fluxograma básico das rotinas do algoritmo de controle. . . . .	41
Figura 28 – Declaração das variáveis de conexão a rede wifi. . . . .	42
Figura 29 – Conexão na rede wifi e geração do endereço de IP da página web. . . . .	43
Figura 30 – Visualização da página web do supervisor. . . . .	44
Figura 31 – Obtenção das variáveis. . . . .	45
Figura 32 – Trecho de código em HTML. . . . .	46
Figura 33 – Obtenção das variáveis. . . . .	47

Figura 34 – Organização dos dados na saída da porta serial. . . . .	48
Figura 35 – Coleta de dados da porta serial com Excel. . . . .	48
Figura 36 – Planilha de coleta de dados para tratamento. . . . .	49
Figura 37 – Ligação de baterias em paralelo com distribuição de carga balanceada. . . .	53
Figura 38 – Ensaio motor monofásico ventilador 55 W. . . . .	56
Figura 39 – Percentual de profundidade de descarga ao longo do tempo para o ensaio com ventilador 55 W. . . . .	56
Figura 40 – Corrente ao longo do tempo para o ensaio com ventilador 55 W. . . . .	57
Figura 41 – Ensaio motor monofásico refrigerador 250 W. . . . .	58
Figura 42 – Percentual de profundidade de descarga ao longo do tempo para o ensaio com refrigerador 250 W. . . . .	59
Figura 43 – Corrente ao longo do tempo para o ensaio com refrigerador 250 W. . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisas relacionadas ao tema desse estudo. . . . .	14
Tabela 2 – Informações técnicas do módulo SP75. . . . .	34
Tabela 3 – Tabela de dados relevantes do sistema. . . . .	50
Tabela 4 – Vida útil das baterias em função da profundidade de descarga. . . . .	51
Tabela 5 – Características técnicas de uma bateria em relação a velocidade de descarga. .	52
Tabela 6 – Percentual de descarga em relação a tensão medida na bateria. . . . .	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ADC</i>	Conversor Analógico Digital
<i>CC</i>	Corrente Contínua
<i>CA</i>	Corrente Alternada
<i>CLP's</i>	Controladores Lógicos Programáveis
<i>HTML</i>	Linguagem de Marcação de HiperTexto
<i>On/Off</i>	Liga/Desliga
<i>I/Os</i>	Entradas e Saídas
<i>IP</i>	Internet Protocol
<i>USB</i>	Universal Serial Bus

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Baterias_{paralelo}$	Quantidade de baterias ligadas em paralelo
$Baterias_{serie}$	Quantidade de baterias ligadas em série
$Capacidade_{banco}$	Capacidade do banco de baterias
$Capacidade_{bateria}$	Capacidade individual das baterias utilizadas no banco de armazenamento
$Coef_{baterias}$	Coefficiente de rendimento das baterias
$Coef_{inversor}$	Coefficiente de rendimento do inversor
$Consumo_{carga}$	Consumo da carga ligada ao banco de baterias
$Consumo_{corrigido}$	Consumo da carga ligada ao banco de baterias com fator de correção
$Energia_{armazenada}$	Energia armazenada pelo sistema
$h$	Hora
$I$	Corrente (A)
$Potncia_{carga}$	Potência da carga aplicada
$Profundidade_{descarga}$	Profundidade de descarga do banco de baterias
$Quantidade_{baterias}$	Quantidade total de baterias no sistema
$Tempo$	Tempo de autonomia do sistema
$Tenso_{banco}$	Tensão do banco de baterias
$Tenso_{bateria}$	Tensão de uma bateria
$V$	Tensão (V)
$V_{cc}$	Tensão em corrente contínua (V)
$W$	Potência (W)
$w_r$	Incerteza combinada
$w_i$	Incerteza combinada da corrente elétrica

$w_{VCC}$  Incerteza combinada da tensão em c.c.

### Símbolos Gregos

$\beta$	Inclinação da superfície
$\delta$	Declinação solar
$\gamma$	Latitude do local
$\phi$	Ângulo azimutal da superfície solar
$\omega$	Ângulo horário
$\mu$	Micro

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>TRABALHOS CORRELATOS</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>ENERGIA DO SOL</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO PARA RADIAÇÃO SOLAR</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>MÓDULOS FOTOVOLTAICOS</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</b>	<b>23</b>
2.6.1	Sistemas <i>off grid</i>	23
2.6.2	Sistemas <i>on grid</i>	24
2.6.3	Sistemas Híbridos	25
<b>2.7</b>	<b>BANCO DE ARMAZENAMENTO</b>	<b>26</b>
2.7.1	Baterias	26
2.7.2	Baterias de chumbo-ácido	27
<b>2.8</b>	<b>INVERSORES</b>	<b>28</b>
<b>2.9</b>	<b>CONTROLADORES DE CARGA</b>	<b>29</b>
<b>2.10</b>	<b>SISTEMAS SUPERVISÓRIO</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>SISTEMA DE GERAÇÃO</b>	<b>32</b>
3.1.1	Descrição da instalação do sistema de geração	32
3.1.2	Módulos fotovoltaicos	33
3.1.3	Inversor CC/CA	34
3.1.4	Controlador de carga	35
3.1.5	Baterias	36
<b>3.2</b>	<b>SISTEMA DE MONITORAMENTO</b>	<b>37</b>
3.2.1	Aquisição de dados	37
3.2.1.1	<i>Sensor de corrente</i>	37
3.2.1.2	<i>Sensor de tensão</i>	38
3.2.1.3	<i>Microcontrolador ESP32</i>	39
3.2.2	Algoritmo de Monitoramento	41
3.2.3	Sistema supervisório	42

3.2.4	Tratamento de dados . . . . .	46
<b>3.3</b>	<b>BANCO DE ARMAZENAMENTO . . . . .</b>	<b>49</b>
3.3.1	Cálculo da capacidade do banco de armazenamento . . . . .	49
3.3.2	Associação entre baterias que compõe um banco de armazenamento . . . . .	53
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio com carga ligada ao banco de baterias . . . . .</b>	<b>54</b>
4.1.1	Ensaio com ventilador 55 W. . . . .	55
4.1.2	Ensaio com geladeira 250 W. . . . .	57
4.1.3	Constatações referentes aos ensaios realizados. . . . .	60
<b>4.2</b>	<b>Análise de incertezas de medição. . . . .</b>	<b>61</b>
4.2.1	Propagação de erros. . . . .	61
4.2.2	Incertezas nas medidas de correntes contínuas. . . . .	61
4.2.3	Incertezas nas medidas de tensões contínuas. . . . .	62
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXO A – CÓDIGO DO ALGORÍTIMO DO CONTROLADOR. . .</b>	<b>67</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde que o homem passou a compreender o fenômeno físico e conseqüentemente controlar a eletricidade, a conversão de diferentes tipos de energia em energia elétrica, tem sido um grande desafio para a humanidade, o crescimento da população mundial, juntamente com a grande quantidade e variedade de equipamentos elétricos, tem exigido uma demanda cada vez maior de energia elétrica. (MATOS; CATALÃO, 2013), chama a atenção para o fato de que a maior parte da energia produzida em países desenvolvidos é proveniente de grandes plantas geradoras centralizadas e para obter essa energia tão importante no dia a dia das pessoas, essas grandes usinas acabam interferindo de forma nociva na natureza, seja gerando grandes mudanças no meio ambiente, como por exemplo, desviando o curso de um rio, ou até mesmo causando grande poluição, através de emissão de gases na atmosfera ou descarte de resíduos de diversos tipos.

A energia solar fotovoltaica, que segundo (IMHOFF,2007) apud (FREITAS, 2008) pode ser definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade, esse processo se dá através de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio de efeito fotoelétrico ou fotovoltaico. Apesar de não ser uma tecnologia tão nova assim, a obtenção de energia elétrica através da conversão da energia solar, vem ganhando muita notoriedade nos últimos anos, inclusive para aplicações mais cotidianas, como o abastecimento de residências, por exemplo. Através de um sistema, composto basicamente por painéis solares e inversores, já se pode obter de forma economicamente viável, energia elétrica, compatível com os equipamentos elétricos utilizados na indústria, comércio, residências, agronegócio, entre outras muitas aplicações. Outro ponto que torna um sistema fotovoltaico muito interessante, é o fato de que o impacto de um sistema desse tipo no meio onde é instalado pode ser considerado praticamente nulo.

(ALVES, 2019), ressalta que esse tipo de sistema utiliza o modelo de geração distribuída, aplicado nas configurações *on grid*, *off grid* ou sistema híbrido. Na versão *on grid*, a mais usual, o sistema fica ligado a rede da distribuidora, e enquanto as placas ficam expostas a luz solar, a energia elétrica é gerada e consumida de forma instantânea, o que se chama de auto consumo, o excedente gerado nesse período de exposição dos módulos fotovoltaicos a luz solar é lançado na rede da distribuidora, gerando créditos que poderão ser utilizados no momento em que não há luz solar, toda essa relação de energia gerada e energia consumida da rede é feita por um relógio bidirecional. Na configuração *off grid* ou sistema isolado como também é conhecido, a instalação independe da rede da distribuidora, a reserva de energia é feita através de um banco de baterias, que em momentos onde que as placas não estão expostas a luz solar, irá suprir a necessidade de consumo por um tempo determinado. No caso do sistema híbrido, como o nome mesmo sugere, contempla a aplicação de diferentes tipos de geração de energia.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Dimensionar, instalar e monitorar o funcionamento de um banco de baterias aplicado a um sistema de geração de energia solar que opera na modalidade *off grid*, esse banco de armazenamento deve possibilitar a projeção de uma determinada autonomia para a carga. Além disso, desenvolver um sistema supervisorio que possibilite a interação do usuário com a instalação, a partir de uma interface que contenha as informações mais relevantes referentes ao funcionamento da estrutura geradora de energia e do banco de armazenamento.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- A partir do sistema de monitoramento acompanhar o funcionamento do sistema de armazenamento com diferentes tipos de cargas aplicadas.
- Através de uma planilha eletrônica receber e consolidar os dados recebidos do sistema de monitoramento.
- Evidenciar informações relevantes do sistema no supervisorio web.
- Dimensionar de forma teórica a capacidade de armazenamento necessária para fornecer a autonomia pretendida para a carga.
- Realizar ensaios que possam comprovar de forma prática a capacidade do banco de armazenamento para que esse possa fornecer uma autonomia de 48 h a um refrigerador de 250 W.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 TRABALHOS CORRELATOS

Com os sistemas de geração de energia fotovoltaica cada vez mais em evidência, a condição de se ter autonomia energética sempre é discutida, ou seja, a possibilidade de independer totalmente do sistema de geração tradicional, esse fato acaba remetendo ao conceito de sistema isolado. Muitos projetos vem sendo desenvolvidos nos últimos anos com relação a esse assunto e na Tab. 1 podemos observar alguns que possuem um tema diretamente ligado a proposta da pesquisa desenvolvida nesse trabalho.

Tabela 1 – Pesquisas relacionadas ao tema desse estudo.

Autor	Descrição
(MARQUES; KRAUTER; LIMA, 2009)	Nesse estudo é abordado o histórico referente a geração e a utilização da energia elétrica nos estados do nordeste brasileiro, que segundo os autores trata-se da região que tem as melhores condições climáticas para geração de energia fotovoltaica no país. Os autores visam dimensionar um sistema isolado e averiguar a viabilidade econômica da instalação em regiões nordestinas onde não há rede de transmissão, porém salientam o alto custo que envolve a instalação e a manutenção de um sistema acumulador de energia.
(ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014)	Esse trabalho trata da aplicação da energia fotovoltaica na agricultura familiar. Os autores tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema isolado para subrir a demanda energética de uma planta de irrigação de alfaces. Para esse cenário pode-se verificar uma particularidade muito interessante no formato do armazenamento de energia, pois além do banco de baterias convencional, são usados reservatórios de água elevados em relação a plantação de alfaces, dessa forma, enquanto há luz solar as bombas irrigam, enchem os reservatórios e carregam as baterias, quando não há mais sol, o sistema tem a energia elétrica armazenada no banco e a anergia potencial gravitacional armazenada nos reservatórios de água.
(VALENTE, 2015)	O autor trata do estudo de viabilidade de instalação de um sistema de geração fotovoltaico com banco de armazenamento de energia, a ideia é que a estrutura funcione como uma fonte auxiliar a uma central de geração térmica que é a única responsável por subrir a demanda de energia na Ilha do Porto, localizada no arquipélago da Madeira em Portugal. O estudo tem como base a simulação em ambiente computacional e conclui que a instalação se torna viável, pois o projeto descentralizaria o fornecimento de energia elétrica na região.
(BLOCKER, 2018)	Esse projeto trata do desenvolvimento de um sistema de bombeamento hidráulico autônomo, composto por equipamentos utilizados em sistemas isolados como, módulo fotovoltaico, controlador de carga e bateria, além da aplicação de um sistema de controle que permite o monitoramento das variáveis envolvidas no sistema através da plataforma Arduino. Por tratar-se de um produto e necessitar de uma boa relação custo benefício, autor salienta o impacto do sistema acumulador de energia no preço final.
(HOHMANN; OLIVEIRA; RÚTHER, 2022)	Nesse projeto é avaliada a viabilidade do uso de baterias de segunda vida, no caso em específico baterias de carros elétricos que acabam sendo substituídas devido ao fato de não atenderem mais a necessidade de um automóvel, porém podem ser utilizadas em outras aplicações com menos estresse energético como, por exemplo, em um banco de armazenamento de um sistema isolado residencial. Segundo o autor, essa aplicação se faz viável, pois em média baterias de veículos elétricos utilizados como taxi por um período de 5 anos, ainda apresentam 60% de sua capacidade original,

Fonte: O autor.

Pode-se considerar que os trabalhos correlatos apresentados, de um modo geral, possuem relação direta ao principal tema abordado no presente estudo, a geração e armazenamento de energia com o objetivo de tornar possível uma determinada autonomia para aplicações diversas. Porém, existem características similares ou distintas ao modelo desse estudo que podem ser destacadas de forma individual. (MARQUES; KRAUTER; LIMA, 2009), tem como destaque a semelhança no dimensionamento de uma sistema isolado com capacidade de acumular energia para uma determinada aplicação, os autores ainda salientam as dificuldades encontradas em função do alto custo de instalação e manutenção desse tipo de sistema, questões essas também evidenciadas no presente estudo. (ALVARENGA; FERREIRA; FORTES, 2014), apresentam uma proposta muito distinta aplicada a agricultura familiar, a inserção de um sistema auxiliar de armazenamento convertendo a energia elétrica gerada em energia potencial gravitacional que pode ser utilizada em momentos em que o sistema gerador não esteja operando. Outro destaque é a aplicação de um sistema acumulador por (VALENTE, 2015), que diferentemente da proposta desse trabalho visa a geração e armazenamento de energia elétrica fotovoltaica como fonte auxiliar a uma central de geração térmica. (BLOCKER, 2018) visa desenvolver um projeto de bombeamento autônomo, que assim como a estrutura desenvolvida ao longo dessa pesquisa, possui um sistema de monitoramento que coleta, salva e trata os dados referentes ao funcionamento da instalação. Por fim (HOHMANN; OLIVEIRA; RÜTHER, 2022) tratam de um tema mencionado não só nesse projeto, mas na grande maioria dos trabalhos relacionados pesquisados, a diminuição de custo de aquisição e instalação do banco de armazenamento, que os autores através do estudo concluíram que pode ser viabilizada através do uso de baterias reutilizadas vindas de carros elétricos.

## 2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Segundo (SEVERINO; CAMARGO; OLIVEIRA, 2008), o conceito de geração distribuída não é necessariamente o oposto ao que se entende por geração centralizada. Ainda que o nome sugira, a geração centralizada não está alocada em um único ponto, da mesma forma que a geração distribuída não estará presente em todas as unidades consumidoras. No formato tradicional de geração de energia, jamais teríamos uma única usina responsável por toda a demanda, pois todo esse processo requer uma estrutura muito grande, além do fato de que poucos lugares tem condições geográficas de receber uma usina. O que fica claro é que o conceito de geração distribuída não é algo tão distinto do que já se conhece, porém no formato distribuído, se tem um maior número de usinas com capacidades adequadas para uma demanda pontual. A Fig. 1 ilustra um modelo de geração distribuída.

Figura 1 – Ilustração de geração distribuída.



Fonte: [www.portalsolar.com.br](http://www.portalsolar.com.br)

A responsabilidade ambiental é um tema discutido frequentemente e tem cada vez mais relevância nas pautas dos governos e órgãos relacionados. Para (SANTOS; SANTOS, 2008) a geração distribuída ganha força nesse ponto, pois o formato remete a implementação de novas tecnologias com o objetivo de obter fontes de energia cada vez mais sustentáveis de forma que o impacto no meio ambiente seja cada vez menor.

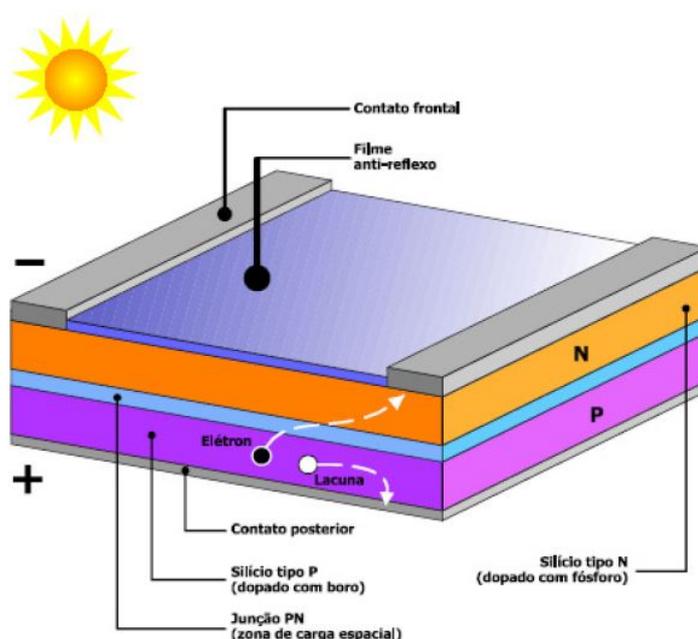
Segundo (MATOS; CATALÃO, 2013), a implementação de forma estruturada de unidades de geração abrange um grande número de situações em diferentes pontos. A melhoria na qualidade da energia disponibilizada pode ser considerada um fator significativo, assim como a redução de perdas no sistema. Sistemas de geração distribuída para serem considerados desenvolvidos precisam ter perdas inferiores a 10%, para que isso seja possível, fatores como uma boa localização e um correto dimensionamento de toda a estrutura são fundamentais no obtenção dos resultados, não só resultados referentes a geração de energia, mas sim resultados que atendam a todos os outros pontos que a integração da geração distribuída se propõe a resolver. Entre os diferentes benefícios técnicos conseguidos, os principais podem ser identificados como:

- Redução de perdas do sistema;
- Melhoria do perfil de tensão;
- O aumento da eficiência energética;
- Melhoria da confiabilidade e segurança do sistema;
- Melhoria da qualidade da energia;
- Redução das emissões de gases de efeito de estufa a partir de centrais de energia centralizadas;
- Redução das cargas nas linhas de transporte e distribuição.

## 2.3 ENERGIA DO SOL

O efeito fotovoltaico que consiste na conversão da energia luminosa que incide sobre células solares em energia elétrica, foi observado pela primeira vez em 1839 por Becquerel. Os módulos que atualmente são comercializados, utilizam silício como material base em sua fabricação, os módulos possuem a aparência externa de uma lâmina circular ou quadrada com tonalidade entre o azul-escuro e o preto. Na parte superior do módulo temos raias na cor cinza, essas raias são compostas por um material condutor, que tem a função de extrair a corrente elétrica que é gerada no momento em que as células estão expostas à luminosidade do sol (ZILLES, 2012). A Fig. 2 ilustra o efeito da energia do sol sobre um módulo fotovoltaico.

Figura 2 – Efeito da energia solar sobre um módulo fotovoltaico.

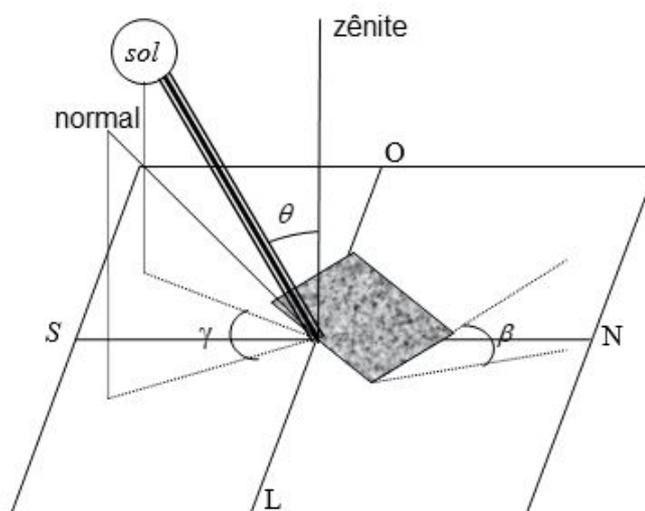


Fonte: camara(2011).

O sol fornece uma grande quantidade de energia ao planeta terra, estima-se que toda a energia solar que atinge a superfície do planeta é dez mil vezes maior do que toda a demanda energética da humanidade, ou seja, apenas 0,01% da energia que a terra recebe do sol seria capaz de suprir todas as necessidades energéticas nos dias atuais. As contribuições da radiação solar não se limitam apenas a energia, pois ela também é importante nos movimentos de circulação atmosférica (ventos) e oceânica, para a vida vegetal e para a formação de combustíveis fósseis. Porém existem dois fenômenos que afetam o percurso da radiação solar até a atmosfera terrestre, a geometria Sol-Terra e os fatores meteorológicos, esses dois fenômenos fazem com que a quantidade de energia recebida do sol pela terra seja atenuada (FREITAS, 2008).

(FREITAS, 2008) ainda relata, que através do ângulo de incidência dos raios solares, pode-se determinar a quantidade de energia proveniente do sol. Para que isso seja possível se faz necessário que alguns fatores geográficos do local sejam conhecidos como, latitude, ângulo horário, declinação solar, ângulo da superfície em relação ao plano horizontal, além da direção para onde serão instalados os módulos fotovoltaicos. As relações geograficas que definem a geometria Sol/Terra são: a inclinação da superfície, a declinação solar, a latitude do local, o ângulo azimutal e o ângulo horário, conforme pode ser observado na Fig. 3.

Figura 3 – Ângulo Zênite, inclinação do plano, superfície azimutal e ângulo solar azimutal para superfícies inclinadas.



Fonte: [www.repositorio.ufc.br](http://www.repositorio.ufc.br)

O ângulo de incidência de radiação solar ( $\theta$ ), em um plano pode ser obtido através da Eq. 1.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ & + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

$\beta$  → inclinação da superfície;

$\delta$  → declinação solar;

$\gamma$  → latitude do local;

$\phi$  → ângulo azimutal da superfície solar;

$\omega$  → ângulo horário.

## 2.4 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO PARA RADIAÇÃO SOLAR

Segundo (DIAS, 2015), na conversão da energia solar em energia elétrica ou térmica, instrumentos que viabilizem a verificação da quantidade de radiação solar em um plano, são indispensáveis para que seja mensurada a quantidade de energia gerada pelo sistema, seja ele elétrico ou térmico. Dois instrumentos são utilizados frequentemente na obtenção de medidas referentes a quantidade de radiação, o piranômetro e o pireliômetro, destinados a medição da radiação global e radiação direta respectivamente.

Conforme pode ser observado na Fig. 4, o piranômetro ainda apresenta duas variações, pois pode ser termoeletrico ou fotovoltaico e possuem diferentes características. Na versão termoeletrico é composto por termopilhas que fazem a medição da irradiância com base na variação de temperatura entre as junções do elemento sensor, a junção quente é revestida de preto e a junção fria fica em contato com o corpo do instrumento e tem a função de dissipar calor, piranômetros termoeletricos possuem uma menor incerteza de medição. Na versão fotovoltaico é composto por um fotodiodo e tem como principal característica maior velocidade de resposta as variações. (INHAQUITES *et al.*, 2020). As respostas espectrais do piranômetro de termopilha e fotovoltaico são apresentadas na Fig. 5.

Figura 4 – Piranômetro termoeletrico (A) e Piranômetro Fotovoltaico (B).

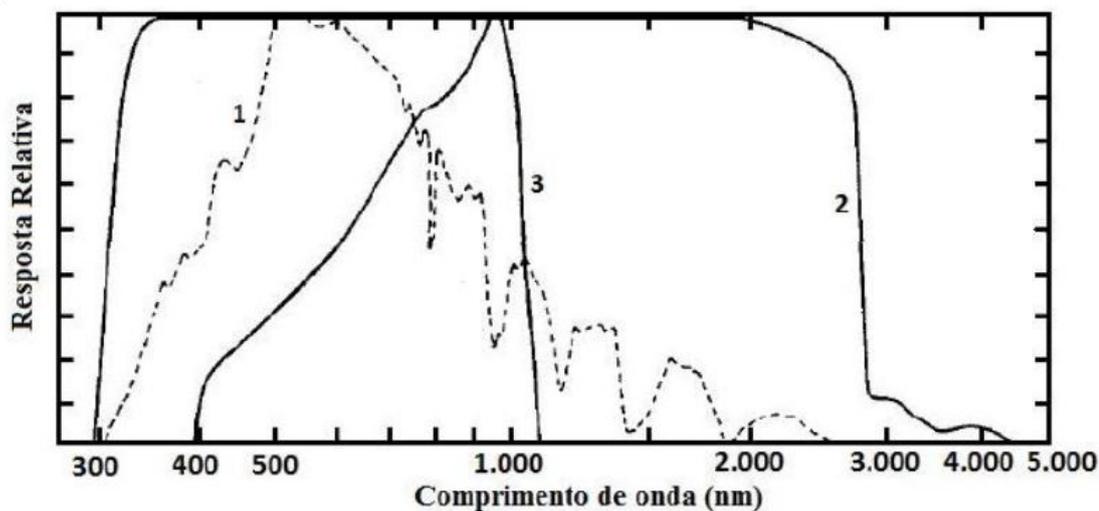


(A)

(B)

Fonte: (DIAS, 2015).

Figura 5 – Comparativo entre respostas espectrais dos diferentes tipos de piranômetros. 1 – Distribuição espectral da irradiância solar na superfície da Terra. 2 – Resposta do piranômetro termoeletrico. 3 – Resposta do piranômetro FV.



Fonte: (INHAQUITES *et al.*, 2020).

A irradiância que incide de forma perpendicular à superfície, por sua vez, é medida pelo pireliômetro, que pode ser observado na Fig. 6. Esse instrumento fica diretamente apontado para o sol, isso permite que seja medida a componente direta, enquanto a componente difusa é bloqueada através das paredes do instrumento que possuem um formato tubular, no fundo desse tubo é fixado um sensor termoeletrico. (DIAS, 2015).

Figura 6 – Pireliômetro Termoeletrico.

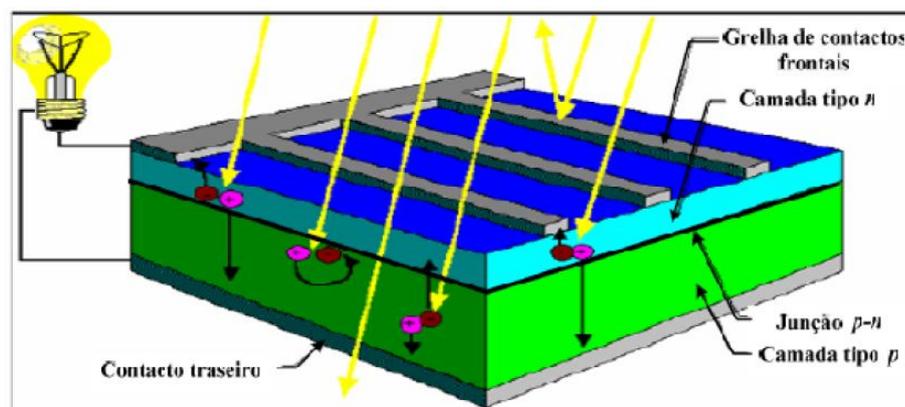


Fonte: (DIAS, 2015).

## 2.5 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Uma célula fotovoltaica em sua constituição tem como principal material um semicondutor chamado silício, que por meio da adição de materiais denominados dopantes, criam o efeito fotovoltaico, efeito esse, que é responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica c.c. Para que haja corrente elétrica em uma célula fotovoltaica é necessário que exista uma diferença de potencial entre as duas camadas da célula, essas camadas que são originadas no processo de dopagem são denominada tipo p e tipo n, que possuem excesso de cargas positivas e negativas, respectivamente. O boro (B) é o material normalmente utilizado para criar a camada p, já a camada n é criada com fósforo (P). Uma vez juntas as camadas p e n, cria-se uma região de transição, denominada junção p-n. (FREITAS, 2008). Na Fig. 7 é possível observar o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

Figura 7 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica (efeito fotovoltaico).



Fonte: (FREITAS, 2008).

Módulos fotovoltaicos podem ser considerados os principais componentes de um sistema fotovoltaico, pois cabe a eles, a captação da irradiação dos raios solares e a sua conversão em energia elétrica. Esses módulos podem ser associados em série e/ou paralelo dependendo das particularidades de cada projeto (PEREIRA & OLIVEIRA, 2011) apud (LANA *et al.*, 2015). A Fig. 8 apresenta módulos fotovoltaicos instalado em uma residência.

Figura 8 – Pannel de onze módulos fotovoltaicos instalados sobre um telhado.



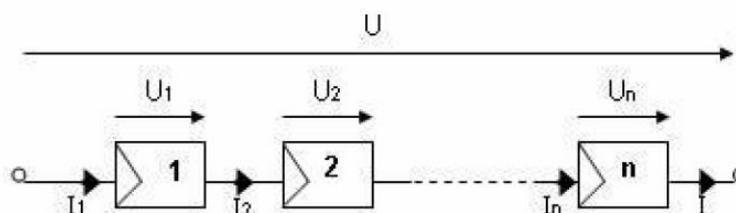
Fonte: www.aldo.com.br

Para módulos associados em série, o terminal positivo de um módulo é ligado ao negativo de outro e assim sucessivamente, logo, as tensões são somadas conforme pode ser observado na Eq. 2, já a corrente permanece a mesma, conforme é possível verificar na Eq. 3. A Fig. 9 ilustra a associação em série dos módulos (DIAS, 2015).

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_N \tag{2}$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_N \tag{3}$$

Figura 9 – Associação de células em série.



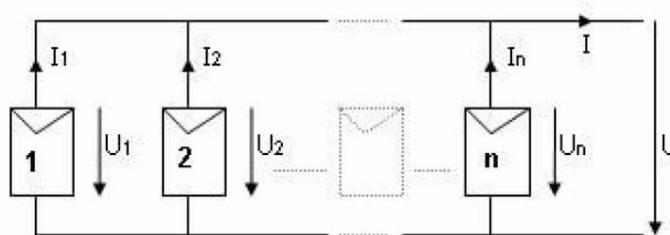
Fonte: (FREITAS, 2008).

Para módulos associados em paralelo, os terminais positivos são ligados juntos, o mesmo se aplica aos terminais negativos, logo, a tensão da associação será a mesma, conforme a Eq. 4, as correntes por sua vez são somadas, o que pode ser verificado na Eq. 3. A Fig. 10 ilustra a associação em paralelo dos módulos (DIAS, 2015).

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_N \quad (4)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N \quad (5)$$

Figura 10 – Associação de células em paralelo.



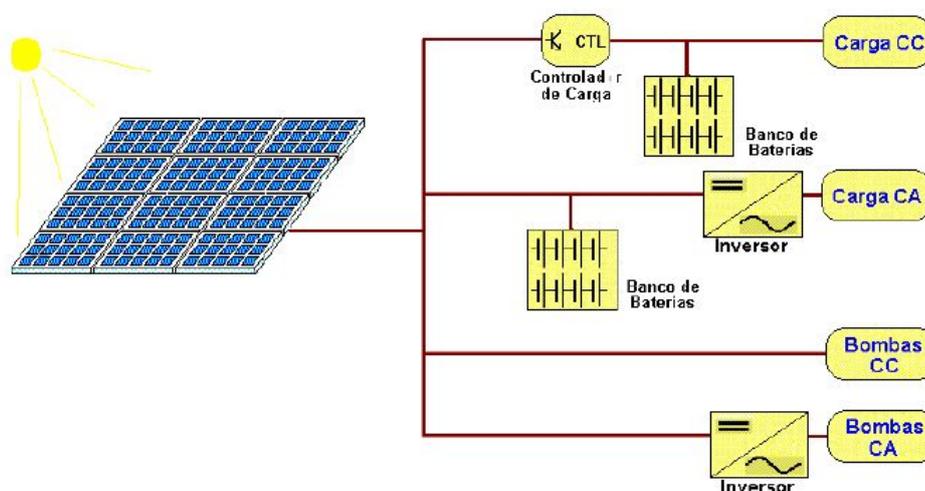
Fonte: (FREITAS, 2008).

## 2.6 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

### 2.6.1 Sistemas *off grid*

Sistemas *off grid* caracterizam-se por possuírem meios de armazenamento de energia, normalmente esse armazenamento é obtido através de um banco de baterias, que uma vez carregadas, garantem que mesmo que os painéis fotovoltaicos não fiquem expostos aos raios solares, ainda assim, o sistema será capaz de manter as cargas ligadas a ele por um tempo predeterminado no projeto. Esse tipo de sistema conta com um dispositivo chamado controlador de carga, que é responsável por garantir que não haja danos as baterias por sobrecarga ou descarga profunda (CÂMARA, 2011). A Fig. 11 ilustra um esquemático de um sistema *off grid*.

Figura 11 – Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.



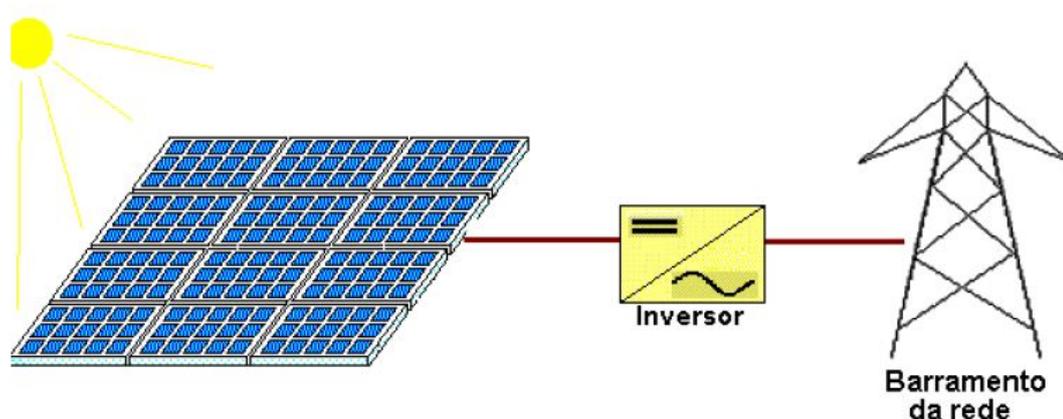
Fonte: CRESESB.

No planeta o número de pessoas que fazem uso de energia elétrica é extremamente grande, isso demonstra a importância e a necessidade de que toda a população mundial tenha acesso a uma qualidade de vida adequada. De encontro a essa ideia, a descentralização da distribuição de energia, bem como o aproveitamento de fontes renováveis pode contribuir muito para que um número ainda maior de pessoas no planeta tenham acesso a eletricidade. Habitantes de regiões mais afastadas dos grandes centros de distribuição de energia sentem grande dificuldade de ter energia elétrica disponível, podemos relacionar esse fato aos grandes custos relacionados ao transmitir e distribuir energia até lugares isolados, pois geralmente o baixo consumo não torna um projeto de fornecimento de energia economicamente viável, uma vez que se faz necessário uma extensa rede de transmissão em alta tensão para o atendimento desses consumidores. Nesse ponto, os sistemas *off grid* se tornam uma boa opção em regiões remotas, que carecem de uma estrutura de transmissão adequada como, por exemplo, zonas rurais, fazendas, sítios, estacionamentos e praias (ALVES, 2019).

### 2.6.2 Sistemas *on grid*

Esse tipo de sistema tem a característica de não possuir estrutura de armazenamento de energia, uma vez que a energia gerada é entregue a rede. Sistemas *on grid* são complementares ao sistema de grande porte ao qual são conectados. Os inversores que fazem parte do sistema são os responsáveis por fazer a interface com a rede elétrica, esses equipamentos precisam atender um bom padrão de qualidade e segurança, pois precisam interagir com a rede sem que ela seja afetada. (CÂMARA, 2011). Na Fig. 12 pode ser observado o esquemático de um sistema *on grid*.

Figura 12 – Esquema de sistema interligado à rede elétrica.



Fonte: CRESESB.

Sistemas *on grid* utilizam o princípio de geração distribuída e são classificados de acordo com a capacidade de geração. Em projetos de microgeração ou minigeração, os mais comuns, normalmente as unidades geradoras de energia ficam muito próximas ou até no mesmo local onde a energia é consumida. Sistemas de geração de energia fotovoltaica ligados a rede elétrica, apresentam maior crescimento em países desenvolvidos, porém há grande potencial para que esse tipo de sistema de geração de energia seja aplicado por todo o mundo, visto que no período diurno a demanda por energia elétrica é sempre maior, esse tipo de sistema contribui para a máxima capacidade de uma rede, além do fato de a demanda por eletricidade ser maior no verão, justamente o período em que as condições da energia emitida pelo sol são as melhores possíveis (ALVES, 2019).

### 2.6.3 Sistemas Híbridos

Em alguns lugares onde se tem uma inviabilidade de fornecimento de energia elétrica, seja pelo fato de necessitarem de uma pequena demanda ou talvez pelos custos referentes a transmissão de energia por longas distâncias, a aplicação de sistemas híbridos se torna uma boa opção (LOPEZ 2012) apud (DIAS, 2015). A Fig. 13 exemplifica a composição de um sistema híbrido de geração de energia.

Figura 13 – Exemplo de sistema híbrido.



Fonte: (FREITAS, 2008).

Dados do ministério de minas e energia, apontam que no mundo nas últimas três décadas se teve uma grande aderência aos sistemas de geração de energia no formato híbrido, esse tipo de sistema, basicamente tem sido aplicado para fornecer energia elétrica para comunidades isoladas, para pequenos sistemas de bombeamento e dessalinização de água, refrigeração, entre outras diversas aplicações. O primeiro sistema híbrido no Brasil trata-se de um eólico-diesel e foi instalado na ilha de Fernando de Noronha, no estado de Pernambuco no ano de 1986. Ainda no Brasil, temos uma grande quantidade de sistemas híbridos implantados na Região Amazônica que atendem a pequenas vilas isoladas dos grandes centros de distribuição de energia. Esse tipo de sistema em lugares isolados tem como característica reduzir o consumo de combustíveis fósseis, além de promover uma troca de conhecimentos e experiências através do desenvolvimento de mão-de-obra qualificada e benefícios socioeconômicos a comunidade local (CARNEIRO, 2009).

## 2.7 BANCO DE ARMAZENAMENTO

### 2.7.1 Baterias

Segundo PINHO & GALDINO (2014) apud (LANA *et al.*, 2015), as baterias são um conjunto de células ou vasos eletroquímicos, que podem ser conectados em série ou paralelo, esses vasos tem a capacidade de armazenar energia elétrica em forma de energia química, através de um processo eletroquímico de oxidação e redução que ocorre no interior da bateria. Atualmente existe uma grande variedade de baterias no mercado, elas variam a sua eficiência de armazenamento e durabilidade de acordo com o tipo de células que lhe são empregadas em sua fabricação, isso certamente acaba influenciando no preço final, pois alguns tipos de baterias

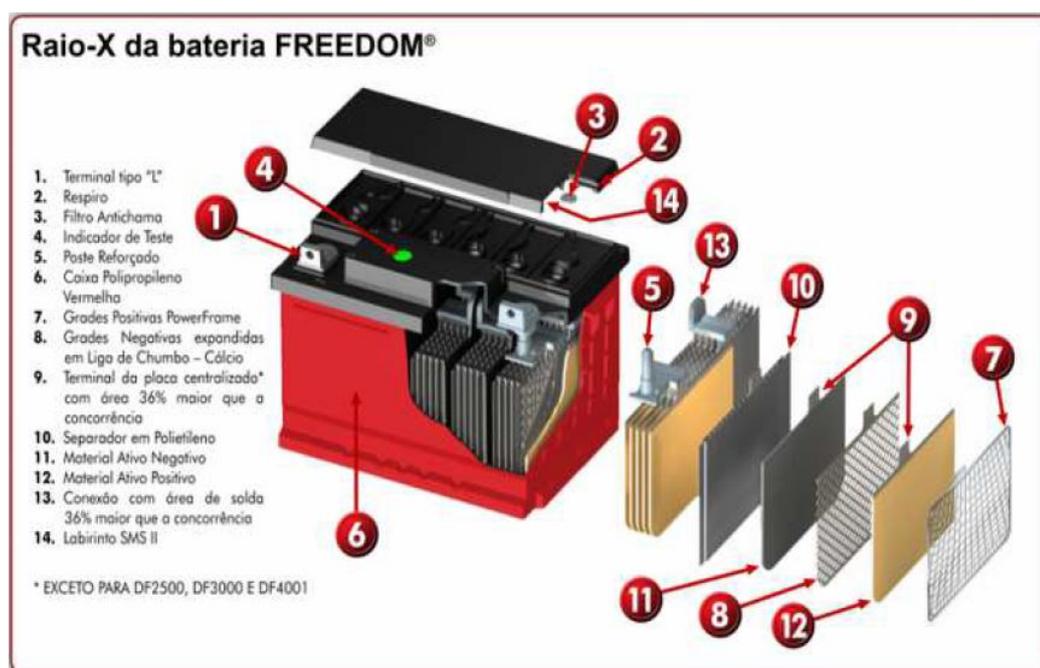
podem não ser economicamente viáveis para determinados projetos, esses são sempre pontos a serem avaliados.

As baterias ou acumuladores como também são conhecidas, são muito utilizadas em sistemas geradores de energia através da radiação solar, principalmente em sistemas *off grid*, pois esse tipo de sistema não fica ligado a rede, e em momentos onde não há geração instantânea de energia, o banco de baterias fica responsável por suprir a demanda energética das cargas. Dazcal & Mello (2008) apud (LANA *et al.*, 2015), definem as baterias aplicadas em um sistema gerador de energia, como dispositivos responsáveis por armazenar a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos, com a função de suprir a demanda do sistema na ausência de radiação solar. Isso faz com que as baterias tenham extrema importância para o funcionamento pleno do sistema, pois a radiação solar não ocorre em períodos noturnos e pode ser muito reduzida dependendo das condições climáticas, como por exemplo, em um dia chuvoso ou nublado.

### 2.7.2 Baterias de chumbo-ácido

Baterias de chumbo-ácido tem essa denominação, pois possuem uma solução aquosa de ácido sulfúrico. Em sua constituição apresentam duas placas de polaridades opostas, que são isoladas entre si ao mesmo tempo que são imersas na solução de ácido sulfúrico. A capacidade de uma bateria chumbo-ácido é determinada pelo número de horas que uma determinada corrente pode ser fornecida por uma bateria com carga total, essa capacidade é expressada em Ampère-hora (Ah). A Fig.14 ilustra a composição estrutural de uma bateria chumbo-ácido.

Figura 14 – Modelo de uma bateria chumbo-ácido.



O fato de as baterias chumbo-ácido serem uma solução de baixo custo, faz com que elas sejam utilizadas com frequência em bancos de armazenamento de sistemas de geração de energia solar, principalmente em sistemas autônomos. Uma célula eletroquímica de chumbo-ácido possui uma tensão nominal de 2 Vcc, sendo assim, para que sejam obtidas as tensões mais comuns no mercado, como por exemplo, 12 V, 24 V e 48 V, se faz necessário a associação em série dessas células eletroquímicas de 2 Vcc, de forma que a tensão desejada seja atingida a partir do somatório das tensões das células associadas. No entanto, a tensão resultante nos terminais da bateria chumbo-ácido varia de acordo com seu estado de carga e também em função do seu processo de carga/descarga, baixando ao longo do processo de descarga e subindo ao longo do processo de carga (FREITAS, 2008).

## 2.8 INVERSORES

Os inversores são dispositivos eletroeletrônicos que tem a função de converter a corrente contínua CC que vem dos painéis fotovoltaicos em corrente alternada CA que é compatível com motores, eletrodomésticos e outros aparelhos que normalmente são utilizados na indústria, comércio e em residências. Em razão dos equipamentos que fazem parte do sistema, a tensão de saída de inversor deve possuir uma determinada frequência e amplitude. Inversores conectados a rede elétrica tem como característica a capacidade de sincronização com a rede a qual estão instalados (DIAS, 2015). A Fig. 15 apresenta um inversor instalado.

Figura 15 – Exemplo de um inversor instalado.



Segundo (FREITAS, 2008), em um sistema solar fotovoltaico ligado a rede, diferentes tipos de inversores podem ser aplicados, isso depende da configuração dos painéis fotovoltaicos, os tipos mais comuns de inversores utilizado são os inversores centrais, de fileira e de multi-fileira. Os painéis fotovoltaicos normalmente são ligados a um único inversor central, porém para sistemas com uma potência instalada maior pode ser que se faça necessário a instalação de um número maior de inversores para que se tenha um desempenho adequado para o projeto.

## 2.9 CONTROLADORES DE CARGA

Controladores de carga, ou como também são conhecidos reguladores de carga, são dispositivos que normalmente são aplicados em sistemas *off grid*, pelo fato de que esse tipo de instalação faz uso de baterias responsáveis por armazenar energia para o sistema. Os controladores de carga tem como principal função, proteger as baterias que fazem parte do sistema de armazenamento de energia, seja por sobrecarga ou descarga extrema, além de que uma vez bem ajustados, podem fazer com que o sistema opere em máxima eficiência Pereira & Oliveira (2011) apud (LANA *et al.*, 2015). A Fig. 16 apresenta a aplicação de um controlador de carga dentro de um sistema.

Figura 16 – Exemplo de controlador de carga com suas entradas e saídas.

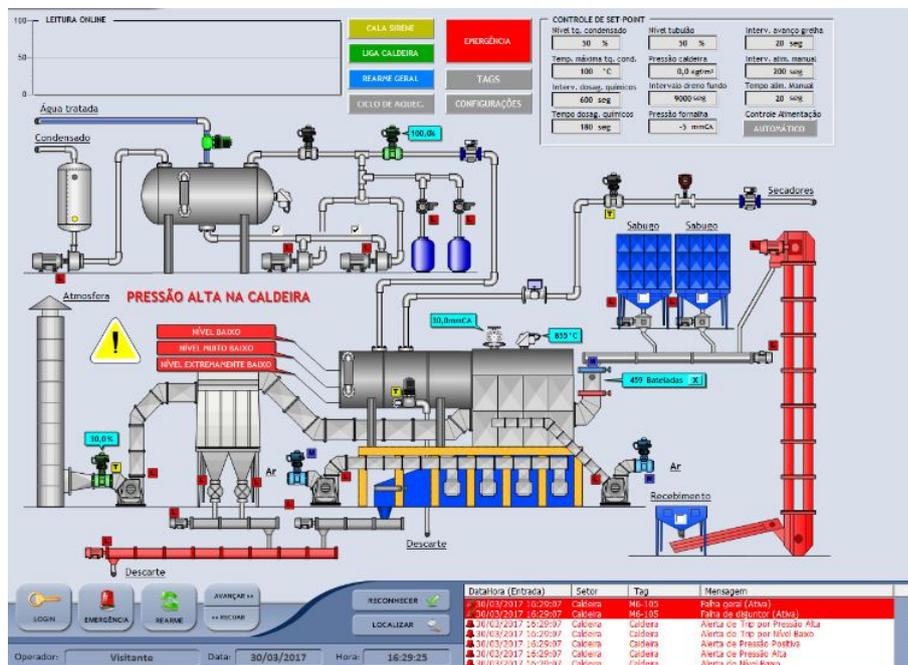


Segundo (DIAS, 2015), os controladores de carga podem ter duas classificações, série ou paralelo. O controlador paralelo, trabalha com um sistema de chaveamento interno que tem a função de desligar ou reduzir o fluxo de corrente elétrica do gerador fotovoltaico para o banco de baterias. Esse dispositivo é ligado em paralelo com o banco de baterias, fazendo com que apenas a quantidade adequada de energia seja transmitida, o dispositivo, ainda conta com um diodo em série com o fluxo de corrente, esse diodo impede o fluxo de corrente reversa em momentos em que o sistema não esteja gerando energia. O controlador série por sua vez, também possui um sistema de chaveamento, porém ligado em série com o fluxo de corrente, não necessitando do diodo de proteção. Esse tipo de controlador é indicado para sistemas que possuem tensões mais baixas. Além desses dois tipos de controladores, também existem os do tipo liga/desliga (on/off), esses trabalham de uma forma bem mais simples, pois aplicam de forma direta no banco de baterias a tensão e a corrente geradas pelo sistema, sem um controle prévio, esse tipo de controlador monitora a tensão instantânea do banco de baterias e uma vez que seja atingida uma tensão predeterminada, simplesmente desconecta os geradores fotovoltaicos.

## 2.10 SISTEMAS SUPERVISÓRIO

Sistemas de supervisão com aquisição de dados, ou como normalmente são chamados supervisórios, são programas desenvolvidos para monitoramento de dados de sistemas em tempo real. Segundo Tibola (2000) apud (DIAS, 2015), esse tipo de sistema proporciona uma interação entre o homem e a máquina, através de alarmes, status em forma de imagem ou até mesmo gráficos, isso faz com que as ações sejam mais seguras e acertivas, além da comodidade de ter uma visão ampla do funcionamento do sistema em uma tela. Esse tipo de sistema ainda possibilita que ações sejam executadas com base em parâmetros preestabelecidos, além da possibilidade de armazenamento de dados que podem ser compartilhados com outros softwares de gerenciamento. A Fig. 17 apresenta a ideia de funcionamento de um sistema supervisório.

Figura 17 – Quadro sinótipo de um sistema SCADA.



Fonte: [www.automatix.com.br](http://www.automatix.com.br)

Há uma grande quantidade de fabricantes que disponibilizam aos seus clientes sistemas supervisórios próprios, porém nesse formato o cliente acaba ficando restrito ao fornecedor o que limita a possibilidade de expansão do sistema. Sistemas supervisórios permitem que as variáveis do processo sejam controladas à distância, sem a necessidade de deslocamento de uma pessoa até onde fica instalado o processo, pois todas as informações relevantes estão na tela do computador, já que as informações de sensores são enviadas para (CLP's), que por sua vez comunicam com o software do sistema supervisório, essa comunicação é feita através de Tags, que são variáveis numéricas ou alfanuméricas que fazem parte do processo a ser supervisionado (DIAS, 2015).

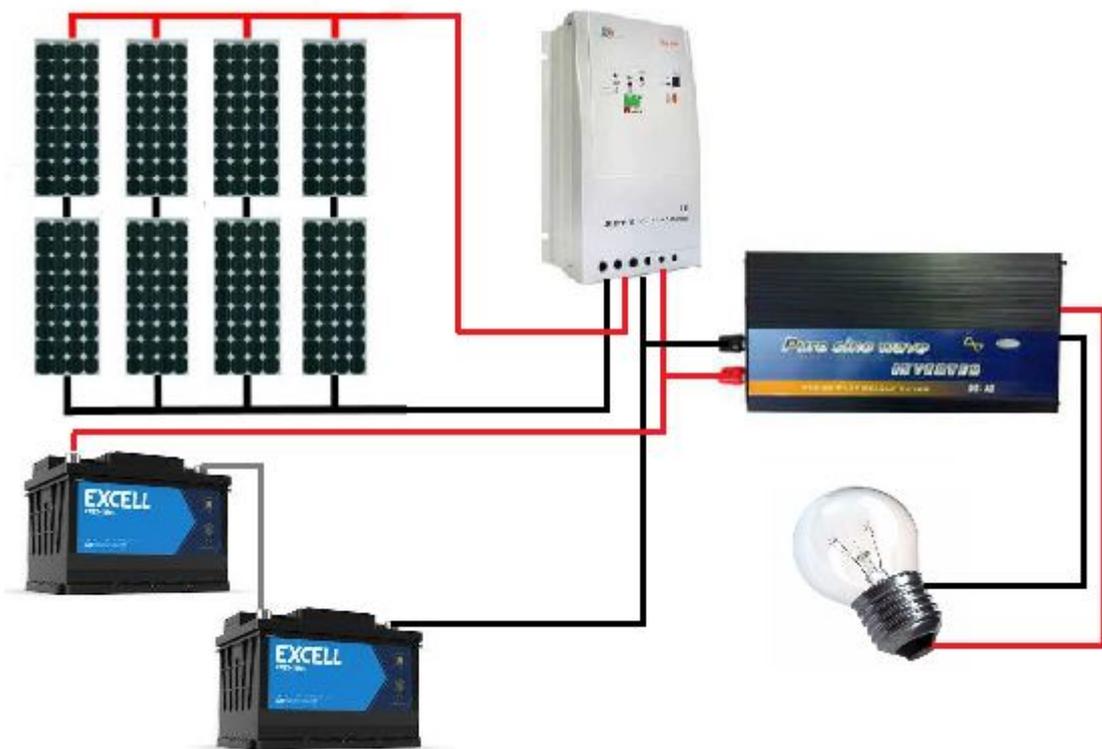
## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 SISTEMA DE GERAÇÃO

#### 3.1.1 Descrição da instalação do sistema de geração

A microrrede isolada está instalada no laboratório de energias renováveis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, no campus de São Leopoldo-RS. O sistema basicamente conta com 8 módulos fotovoltaicos, inversor, controlador de carga e um banco de armazenamento formado por duas baterias. A topologia básica da microrrede pode ser observada na Fig. 18. O conjunto de oito módulos fotovoltaicos, possui ângulo azimutal  $\gamma_s$  de  $180^\circ$  e conta com um recurso de ajuste de inclinação em relação ao plano horizontal de  $30^\circ$ .

Figura 18 – Topologia da microrrede fotovoltaica isolada.

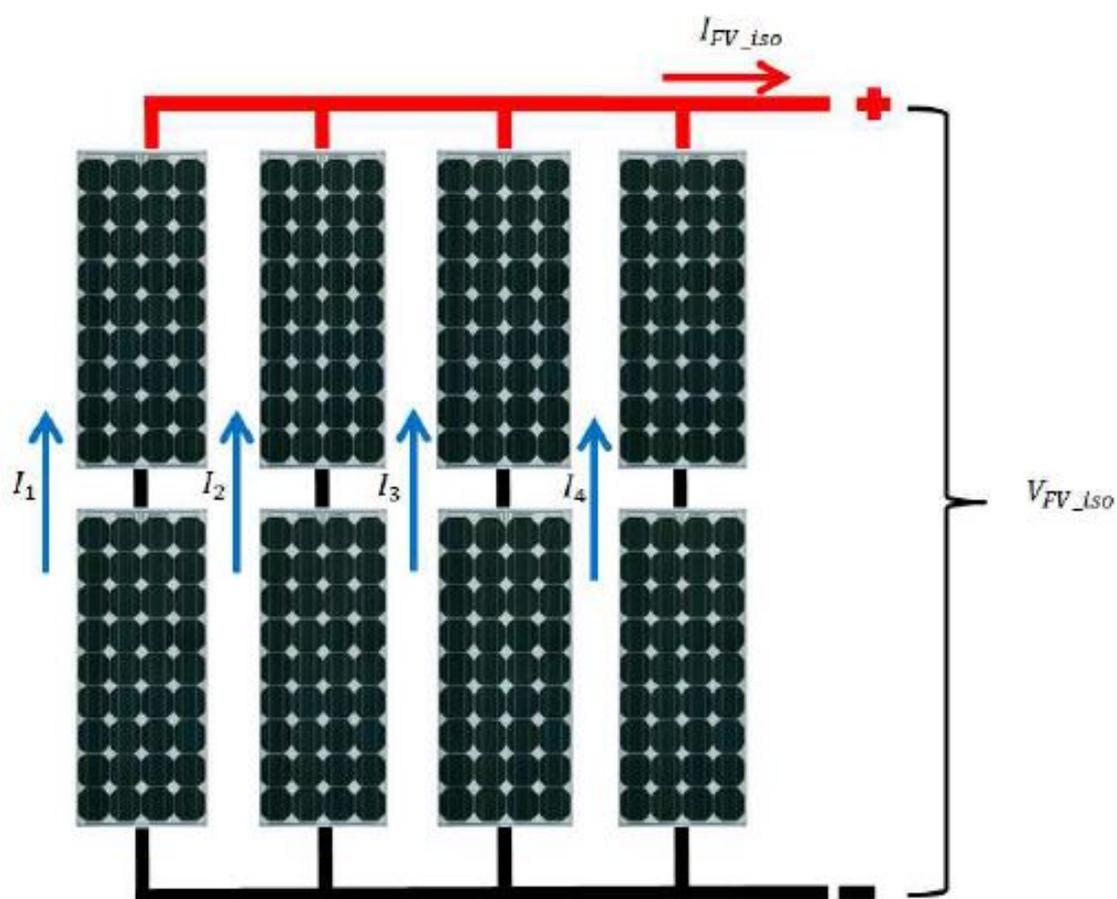


Fonte: O autor.

### 3.1.2 Módulos fotovoltaicos

O modelo de módulo fotovoltaico utilizado no sistema é o SP75 da Siemens, ele é fabricado com silício monocristalino e pode entregar uma potência de até 75 W em condições ideais. O painel de geração é formado por quatro pares desse módulo, sendo que cada par está ligado em série, posteriormente os pares são associados paralelo, conforme pode ser observado no Fig. 19. Esse conjunto de módulos está ligado ao inversor senoidal puro 1000 W/24 V, todo esse sistema tem a capacidade de gerar até 600 W de potência em condições ideais, com uma corrente de até 17,6 A e uma tensão de até 40 V.

Figura 19 – Painel fotovoltaico com 8 módulos monocristalinos.



Fonte: (DIAS, 2015).

Tabela 2 – Informações técnicas do módulo SP75.

CONDIÇÕES PADRÃO DE TESTE	
Máxima Potência	75 Wp
Tensão Máxima do Sistema	600 V
Tensão de Ponto Máx. Pot. [Vmpp]	17 V
Corrente de Ponto Máx. Pot. [Impp]	4,4 A
Tensão de Circuito Aberto [Voc]	21,7 V
Corrente de Circuito Aberto [Isc]	4,8 A
Coefficiente de Temperatura [Voc]	$-77 \times 10^{-2} \text{ V} / ^\circ\text{C}$
Coefficiente de Temperatura [Isc]	$2,06 \times 10^{-3} \text{ A} / ^\circ\text{C}$
NOCT	$45 \pm 2 ^\circ\text{C}$

Fonte: O autor.

### 3.1.3 Inversor CC/CA

O Inversor Senoidal Puro, mostrado na Fig. 20, tem a capacidade de converter corrente contínua enviada pelos módulos fotovoltaico em corrente alternada, porém esse modelo de inversor em específico, não tem a capacidade de conectar-se a rede, sua aplicação destina-se a redes isoladas, onde exista um banco de armazenamento que possa acumular a energia gerada, sua entrada fica ligada em paralelo com o banco de baterias e o controlador de carga.

Figura 20 – Inversor Senoidal Puro 1000 W/24 V.



Fonte: (DIAS, 2015).

Esse equipamento também conta com proteção contra sobrecarga, sobretensão, baixa tensão, curto circuito e aquecimento.

Principais características:

- Potência nominal de saída em corrente alternada de 1000 W.
- Tensão nominal de saída em corrente alternada de 220 V  $\pm$ 10%.
- Distorção armônica total  $\pm$ 3%.
- Tensão de entrada em corrente contínua de 24 V.
- Eficiência de 90% para 24 V na entrada.

#### 3.1.4 Controlador de carga

O gerenciamento de carga e descarga do banco de armazenamento é feito por um controlador de carga MPPT - Trace/3215RN, conforme pode ser observado na Fig. 21. Esse equipamento possui um sistema de rastreamento do ponto de potência máxima para módulos fotovoltaicos através do controle PWM.

Figura 21 – Controlador de carga MPPT - Trace/3215RN.



Fonte: (DIAS, 2015).

Esse equipamento pode operar com uma tensão de até 150 V na sua entrada, com uma corrente máxima de carga e descarga de 20 A e 30 A respectivamente. O painel da instalação que está ligado ao controlador pode gerar uma potência de até 780 W operando com uma tensão de 24 V e 390 W com uma tensão de trabalho de 12 V. Esse equipamento tem a capacidade de realizar o carregamento de baterias chumbo-ácido seladas, gel e abertas, possuindo controle de temperatura o que prolonga a vida útil das baterias utilizadas. Na microrrede estudada, o controlador trabalha com uma potência máxima de 600 W e uma tensão nominal do banco de armazenamento de 24 V.

### 3.1.5 Baterias

O banco de armazenamento de energia que será utilizado no estudo para fins de simulação é formado por duas baterias de Chumbo-ácido da marca Excell de 60 Ah e 12 V cada, o uso desse tipo de bateria é muito comum para banco de armazenamento de energia em sistemas isolados por não necessitarem de manutenção e por custarem menos. Essas duas baterias, estão associadas em série para que seja possível obter uma tensão de 24 V com uma capacidade de carga de 60 Ah. A disposição das baterias no sistema pode ser observada na Fig. 22.

Figura 22 – Baterias do sistema.



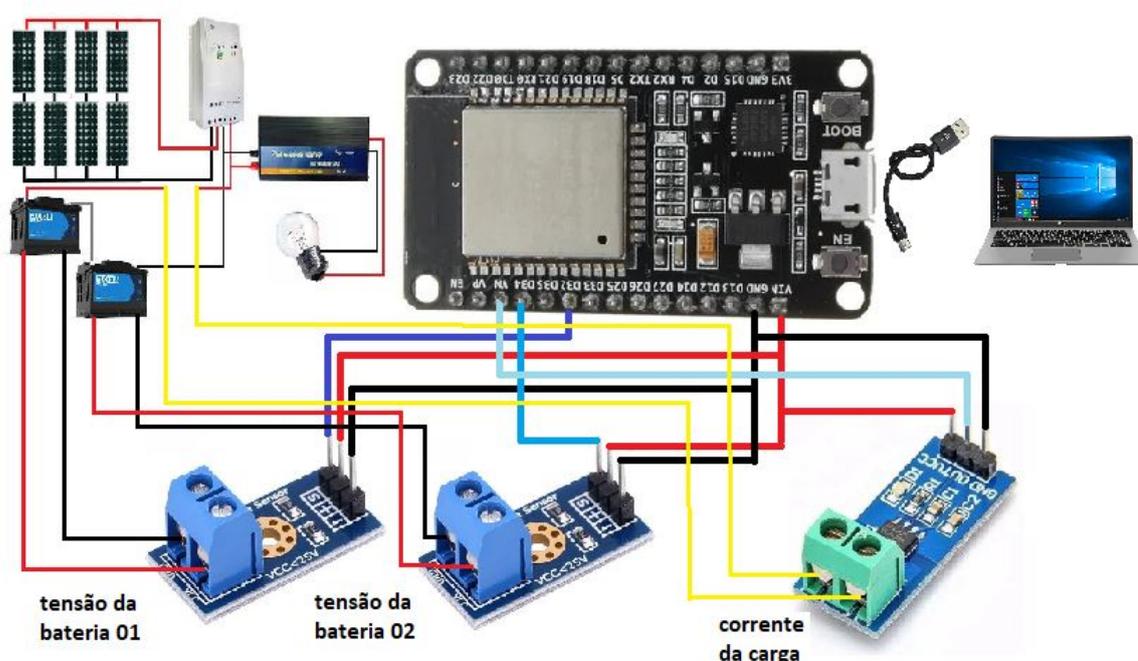
Fonte: O autor.

## 3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO

### 3.2.1 Aquisição de dados

Para tornar possível coletar e organizar os dados referentes ao funcionamento da microrrede isolada e ainda verificar o comportamento do banco de baterias ao ser exigido por determinadas cargas, foi desenvolvido um sistema de monitoramento que é responsável pela aquisição, tratamento e consolidação das informações de operação da instalação. O sistema de aquisição que pode ser observado na Fig. 23, é composto por sensores responsáveis por leituras de corrente e tensão, esses sensores enviam as informações lidas para um microcontrolador que a partir de um algoritmo trata os dados da forma conveniente.

Figura 23 – Topologia do sistema de aquisição de dados.



Fonte: O autor.

#### 3.2.1.1 Sensor de corrente

As correntes elétricas do sistemas são obtidas através de transdutores de corrente do modelo Allegro ACS712, conforme pode ser visto na Fig. 24, trata-se de um circuito integrado (CI) sensível a campos magnéticos. Internamente esse componente apresenta um sensor de efeito Hall, que tem a capacidade de medir tanto corrente contínua quanto corrente alternada, esse tipo de sensor é fabricado para trabalhar em várias faixas de corrente.

Figura 24 – Sensor de corrente ACS712.



Fonte: [www.filipeflop.com](http://www.filipeflop.com)

Principais características:

- Faixa de medição: -30 A a +30 A
- Alimentação: 5 V
- Tempo de resposta de 5  $\mu$ s
- Saída analógica proporcional de 66 mV/A
- Dimensões: 30 mm x 12 mm x 12 mm

### 3.2.1.2 Sensor de tensão

O Sensor de Tensão DC 0-25 V, que pode ser observado na Fig. 25, tem como função fazer medições de tensões contínua (VDC) na faixa de 0 V a 25 V. Seu princípio de funcionamento é baseado em divisores de tensão. Na entrada do módulo, pode ser conectado um valor de tensão DC até cinco vezes maior que o VCC da porta analógica. O Sensor de Tensão DC 0-25 V pode ser utilizado em diversos projetos onde é necessário medir valores de tensão DC ou que seja necessário identificar se um dispositivo DC está ligado ou desligado. As leituras realizadas pelo módulo são rápidas e a conexão ao microcontrolador se dá de forma bem simples.

Figura 25 – Sensor de tensão DC 0-25 V 2281.



Fonte: [www.filipeflop.com](http://www.filipeflop.com)

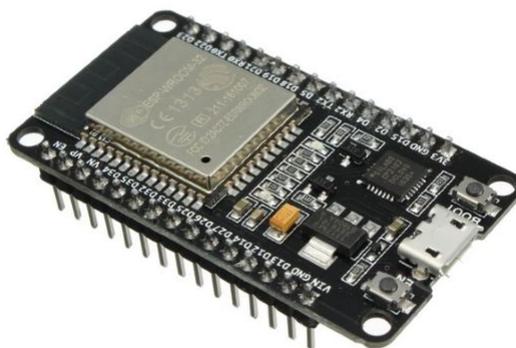
Principais características:

- Tensão de entrada: 0 a 25 V
- Faixa de detecção: 0,02445 - 25 VDC
- Resolução analógica: 0,00489 VDC
- Valor dos resistores: 30 kOhms e 7,5 kOhms
- Proporção de divisão: 5:1
- Tolerância do resistor: 1
- Dimensões: 13 mm(L) X 12 mm(A) X 26 mm(C)
- Peso: 2 g

### 3.2.1.3 Microcontrolador ESP32

A DOIT ESP32 que pode ser observado na Fig.26, é uma plataforma de desenvolvimento, tem como base o módulo ESP32 incorpora a utilização de WiFi, Bluetooth e microprocessador visando atender uma grande variedade de projetos, desde as mais simples, como uma rede de sensores de baixa potência, até aplicações mais complexas, como codificação de voz e transmissão de música.

Figura 26 – Placa Doit ESP32.



Fonte: [www.filipeflop.com](http://www.filipeflop.com)

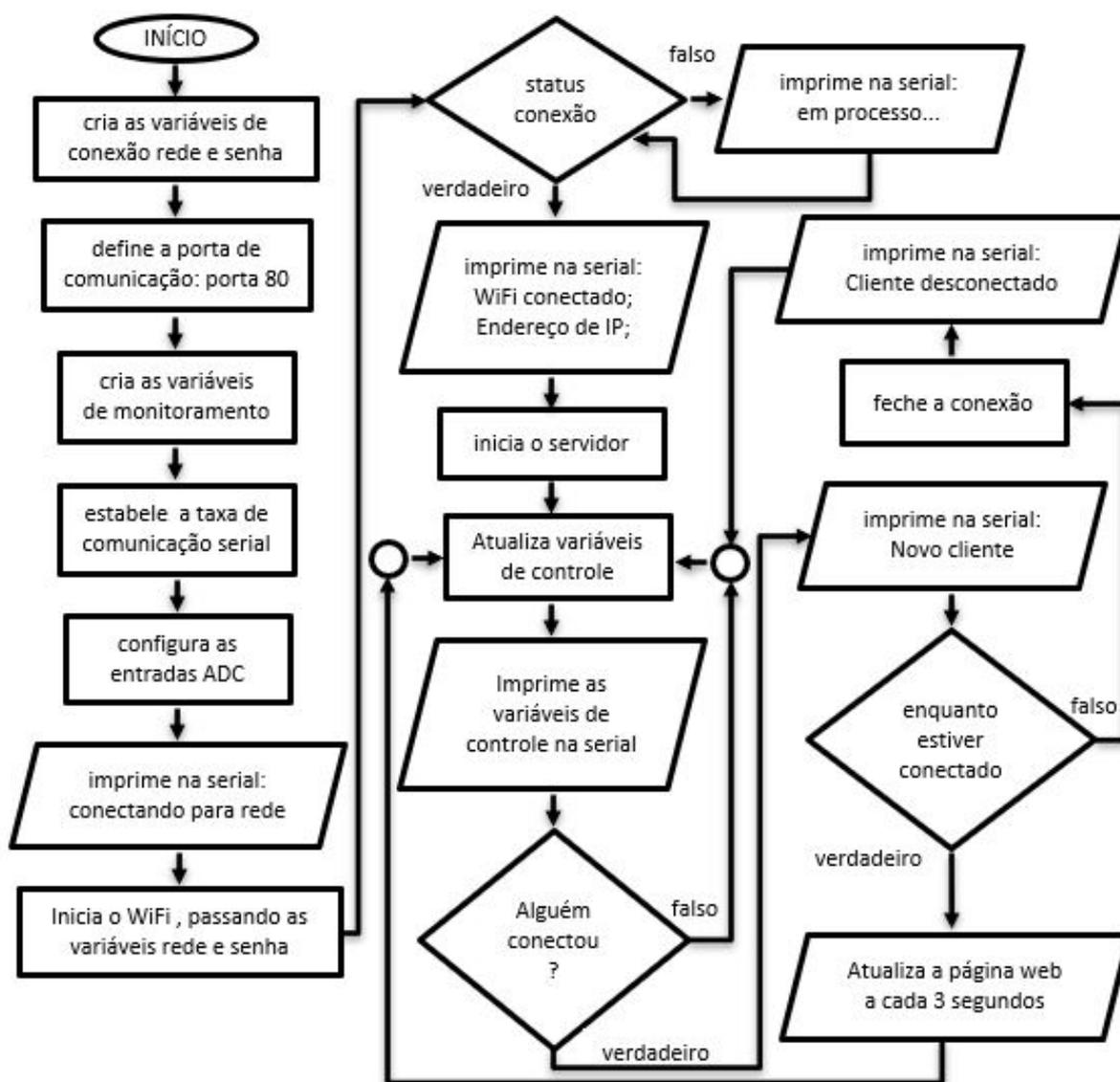
#### Principais características:

- Módulo ESP32-WROOM-32D;
- Chip Base: ESP32-D0WD;
- Processador: Xtensa 32-Bit LX6 Dual Core;
- Clock: 40 à 240 MHz (Ajustável);
- Memória ROM: 448 kB;
- Memória SRAM: 520 kB;
- Memória Flash Externa: 32-Bit de acesso e 4 MB;
- Tensão de Alimentação: 4,5 à 12,0 VDC (Pino Vin);
- Tensão de nível lógico: 3,3 VDC (não tolera V);
- Corrente de consumo: 80 mA (típica);
- Corrente de consumo: 500 mA (máxima);
- WiFi 802.11 b/g/n: 2.4 à 2.5 GHz;
- Segurança WiFi: WPA / WPA2 / WPA2-Enterprise / WPS;
- Compatível com a IDE do Arduino.

### 3.2.2 Algoritmo de Monitoramento

A Fig. 27, apresenta um fluxograma básico da estrutura de funcionamento do algoritmo responsável pelas funções lógicas do sistema. Esse algoritmo foi desenvolvido na IDE do Arduino e tem como diferencial a inserção de funções responsáveis pelo o envio do código no formato HTML para a página web a ser exibida.

Figura 27 – Fluxograma básico das rotinas do algoritmo de controle.



Fonte: O autor.

### 3.2.3 Sistema supervisorio

A capacidade do módulo ESP32 de conectar-se a internet via sinal de wifi, torna possível desenvolver uma das principais características do sistema supervisorio, pois os dados coletados pelo hardware e tratados pelo software são exibidos em uma página web, esse recurso faz com que a página na internet possa ser acessada por qualquer usuário que esteja conectado a mesma rede wifi que a ESP32 estiver. Dentro do programa são criadas as variáveis que receberam o nome da rede e a senha, dessa forma toda vez que o sistema de controle estiver operando a conexão do controlador a internet é feita de forma automática. O trecho de código da declaração das variáveis pode ser observado na Fig. 28.

Figura 28 – Declaração das variáveis de conexão a rede wifi.



```
projeto_supervis_rio | Arduino 1.8.19
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

projeto_supervis_rio $

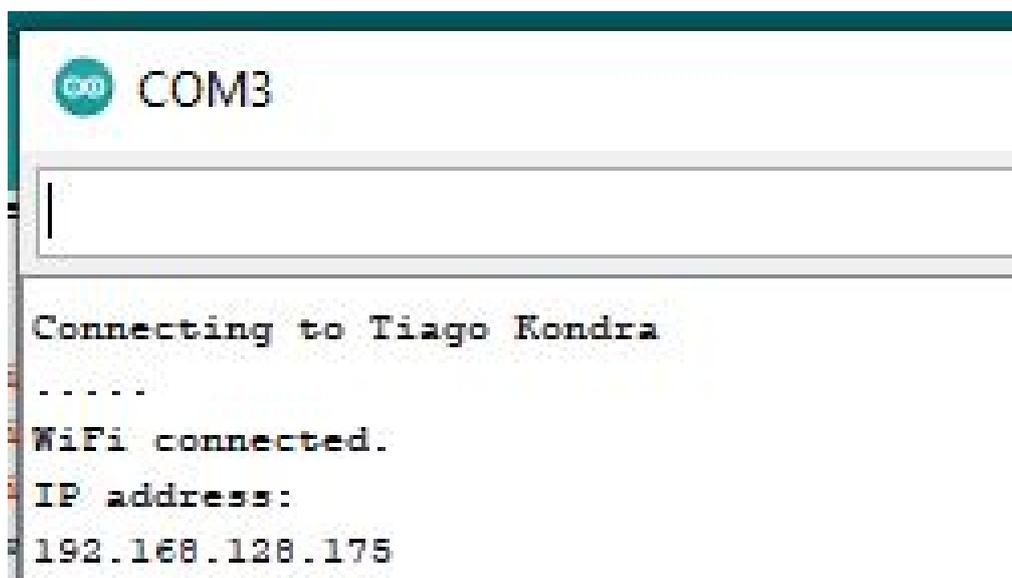
#include <WiFi.h>

const char* ssid      = "Tiago Kondra";
const char* password  = "tiago20016";
```

Fonte: O autor.

O processo de conexão pode ser observado na janela da porta serial do Arduino IDE como mostra a Fig. 29, nessa janela aparecem informações referentes ao andamento do processo de conexão, a confirmação da conexão, além do endereço de IP gerado. Uma vez que a ESP32 estiver conectada a rede, através do IP, o usuário poderá acessar a página web que contém as informações de operação do sistema, basta que o usuário digite o IP gerado no processo de conexão na barra de endereços do seu navegador.

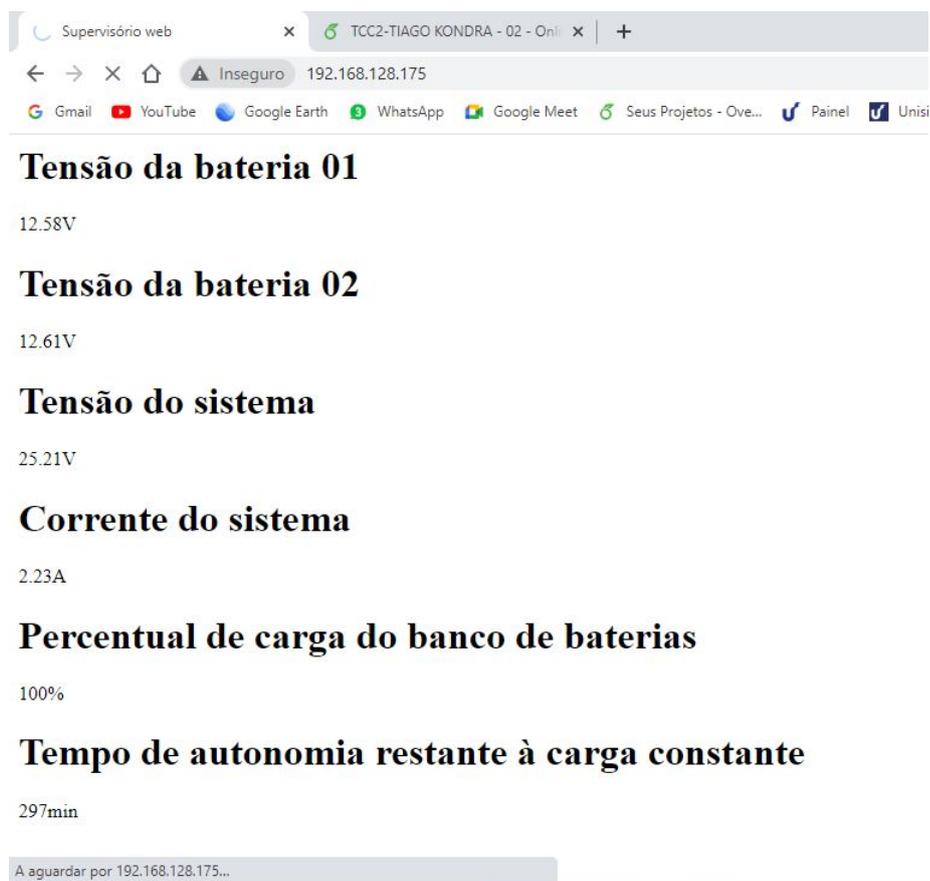
Figura 29 – Conexão na rede wifi e geração do endereço de IP da página web.



Fonte: O autor.

A Fig. 30, ilustra o formato da página web gerada, nela são exibidas informações referentes as tensões individuais das duas baterias que formam o banco de armazenamento, bem como a tensão total que resulta a partir da associação das baterias em série, além de informações relativas a corrente do sistema, percentual de carga do banco de armazenamento e tempo de autonomia do sistema à carga constante. Essas informações são monitoradas durante todo o tempo e são atualizadas no supervisor web a cada 3 segundos, assim que a página for acessada.

Figura 30 – Visualização da página web do supervisor.



Fonte: O autor.

No código responsável pela parte lógica de operação do sistema de monitoramento, as variáveis que serão exibidas e tratadas são obtidas dentro de uma função específica no algoritmo, dentro dessa função são recebidas as leituras realizadas pelos sensores nas entradas AD do microcontrolador, a partir de então, são realizados cálculos para que os dados sejam exibidos em um formato que facilite o entendimento do usuário. A Fig. 31, ilustra o trecho de código que é responsável pelas rotinas de recebimento e tratamento das leituras realizadas durante a operação do sistema.

Figura 31 – Obtenção das variáveis.

```
void atualizaLeiturasADC()
{
    tensao01_32 = String((analogRead(32) / (2986 / 12.6)));
    tensao02_34 = String((analogRead(34) / (2994 / 12.6)));
    tensao_sistema = String((analogRead(32) / (2986 / 12.6)) +
    (analogRead(34) / (2994 / 12.6)));
    corrente_36 = String(analogRead(36));
    percentual_carga = String(100);
    autonomia_restante = String(297);
}
```

Fonte: O autor.

As informações apresentadas no supervisório web, são organizadas em um código HTML dentro do ambiente de programação IDE do Arduino, para que isso seja possível todas as variáveis a serem enviadas são salvas no formato *string* e através de funções da biblioteca *WiFi.h* é realizada a interface dos códigos resultando em informações organizadas dentro do supervisório. A Fig. 32, exibe a função responsável pela organização e execução do código para a página web, dentro dessa função é possível verificar toda a estrutura básica de um código HTML.

Figura 32 – Trecho de código em HTML.

```

void enviaHTMLPaginal() {
    client.println(F( "<html lang=\"pt-br\">" ));
    client.println(F( "<head>" ));
    client.println(F( "    <meta charset=\"utf-8\">" ));
    client.println(F( "    <meta http-equiv= \"refresh\" content=\"3\";>" ));
    client.println(F( "    <title>Supervisório web</title>" ));
    client.println(F( "</head>" ));
    client.println(F( "<body>" ));
    client.println(F( "    <h1>Tensão da bateria 01</h1>" ));
                                client.print(tensao01_32);

    client.println(F( "        V" ));
    client.println(F( "    <h1>Tensão da bateria 02</h1>" ));
                                client.print(tensao02_34);

    client.println(F( "        V" ));
    client.println(F( "    <h1>Tensão do sistema</h1>" ));
                                client.print(tensao_sistema);

    client.println(F( "        V" ));
    client.println(F( "    <h1>Corrente do sistema</h1>" ));
                                client.print(corrente_36);

    client.println(F( "        A" ));
    client.println(F( "    <h1>Percentual de carga do banco de baterias</h1>" ));
                                client.print(percentual_carga);

    client.println(F( "        %" ));
    client.println(F( "    <h1>Tempo de autonomia restante à carga constante</h1>" ));
                                client.print(autonomia_restante);

    client.println(F( "        min" ));
    client.println(F( "</body>" ));
    client.println(F( "</html>" ));
}

```

Fonte: O autor.

### 3.2.4 Tratamento de dados

A estruturação dos dados para tratamento é realizada na mesma função que atualiza as variáveis para a página web, inclusive são utilizadas as mesmas variáveis, que nesse caso são organizadas de forma conveniente na saída serial. A Fig. 33, exibe o trecho de código que realiza a tarefa de envio das variáveis, é possível observar que o processo se dá a partir de funções que fazem a impressão das informações na saída serial.

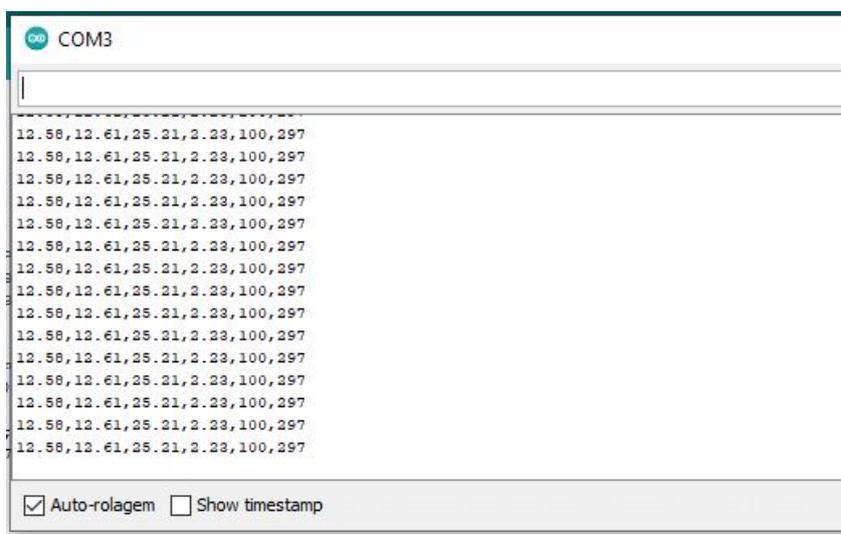
Figura 33 – Obtenção das variáveis.

```
Serial.print(tensao01_32);  
Serial.print(",");  
Serial.print(tensao02_34);  
Serial.print(",");  
Serial.print(tensao_sistema);  
Serial.print(",");  
Serial.print(corrente_36);  
Serial.print(",");  
Serial.print(percentual_carga);  
Serial.print(",");  
Serial.println(autonomia_restante);  
  
    delay(3000);  
}
```

Fonte: O autor.

A Fig. 34 ilustra os dados já exibidos na janela serial do Arduino IDE, essas informações estão devidamente dispostas em um formato que possa comunicar com o ambiente de tratamento e consolidação de dados, pode-se verificar que as informações de cada leitura estão organizados lado a lado e separadas por vírgula, essa atualização é feita a cada 3 segundos e os dados atualizados ficam logo abaixo dos dados anteriores.

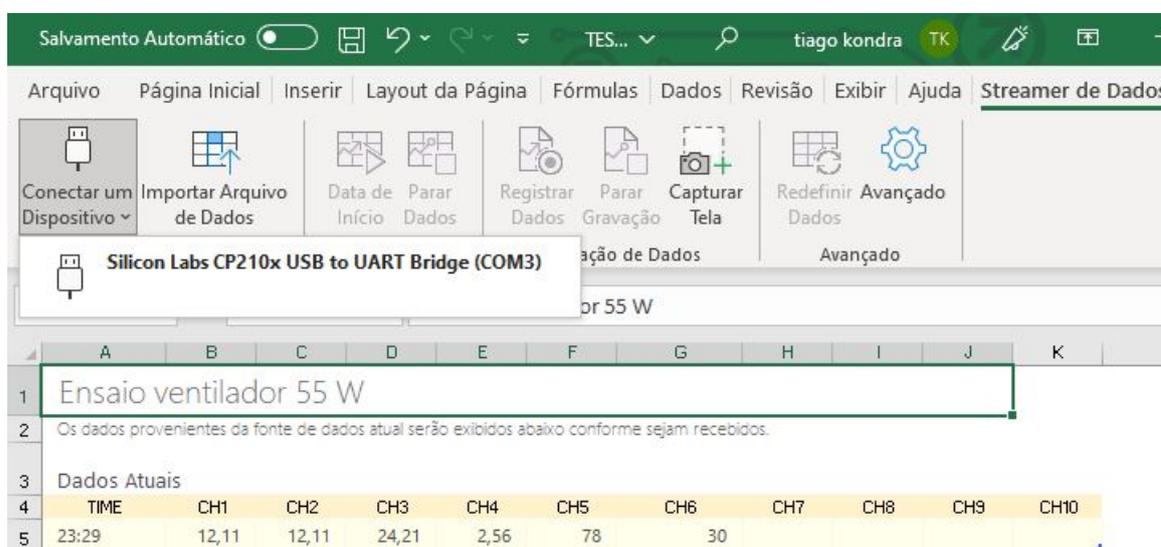
Figura 34 – Organização dos dados na saída da porta serial.



Fonte: O autor.

Os dados que são organizados para serem recebidos da porta serial, são tratados e consolidados no Microsoft Excel, essa planilha eletrônica possui um recurso de comunicação serial que pode ser habilitado nas configurações. Uma vez que essa função é ativada, a planilha eletrônica passa a exibir uma aba chamada *Streamer de Dados* e ao acessar essa opção é possível verificar funcionalidades como a conexão de dispositivo via USB, importação de arquivos, registro de dados, entre outros recursos. A Fig. 35 ilustra o ambiente apresentado na planilha eletrônica com a função de comunicação serial habilitada.

Figura 35 – Coleta de dados da porta serial com Excel.



Fonte: O autor.

Com o recurso de comunicação serial habilitado na planilha eletrônica, a conexão é realizada através do botão *Conectar um Dispositivo*, nesse momento é criada uma planilha que pode receber até 10 variáveis, essa planilha também possui abas inferiores que possibilitam realizar configurações, esses ajustes permitem por exemplo, definir a taxa de transmissão de dados e a quantidade de linhas disponibilizadas para o recebimento dos dados. Com a conexão da planilha eletrônica com a porta serial estabelecida e as devidas configurações realizadas os dados passam a ser recebidos na planilha de acordo com a ordem planejada, conforme pode ser observado na Fig. 36. As informações de corrente e tensão salvas na planilha durante os ensaios com os equipamentos utilizados no experimento, possibilitam um estudo aprofundado referente ao comportamento do banco de armazenamento quando exigido por determinadas cargas.

Figura 36 – Planilha de coleta de dados para tratamento.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Ensaio ventilador 55 W							
2	Os dados provenientes da fonte de dados atual serão exibidos abaixo conforme sejam recebidos.							
3	Dados Atuais							
4	TIME	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
5	23:29	12,22	12,22	24,44	2,23	71	2	
6	Dados Históricos							
7	TIME	bat_01(V)	bat_02(V)	banco(V)	Corrente(A)	banco(%)	autonomia(min)	CH7
8	23:29	12,22	12,22	24,44	2,23	71	2	
9	23:29	12,22	12,22	24,44	2,23	71	2	
10	23:28	12,22	12,22	24,42	2,21	71	2	
11	23:28	12,22	12,22	24,44	2,31	71	2	
12	23:28	12,22	12,21	24,44	2,26	71	2	
13	23:28	12,22	12,22	24,43	2,26	71	2	

Fonte: O autor.

### 3.3 BANCO DE ARMAZENAMENTO

#### 3.3.1 Cálculo da capacidade do banco de armazenamento

Para que seja definida a quantidade de baterias necessárias para que um sistema tenha uma autonomia predeterminada, algumas variáveis como a potência e o tempo de utilização das cargas precisam ser estabelecidas, outro fator importante é determinar se o sistema opera

em corrente contínua c.c. ou corrente alternada c.a. . No caso em específico, trabalha-se no dimensionamento de de um banco de baterias para que forneça autonomia para um refrigerador de 250 W em corrente alternada, por um período de 48 h sem que o sistema de geração seja exposto aos raios solares e que também não haja energia elétrica na rede da concessionária. A Tab. 3 resume os principais dados referentes a modelagem do sistema.

Tabela 3 – Tabela de dados relevantes do sistema.

Equipamento	Qnt.	Potência(W)	Tempo de utilização(h)	Rede(CA/CC)
Refrigerador	1	250 W	48 h	CA

Fonte: O autor.

Para dimensionar o banco de baterias, algumas particularidades da carga precisam ser levadas em conta, uma delas é que o compressor do refrigerador não ficará ligado por 48 h, segundo o fabricante um refrigerador em um período de 24 h fica ligado em média por 8 h, isso faz com que o período de utilização a ser considerado passe de 48 h para 16 h. Logo, para que seja definido o consumo do aparelho dentro do tempo em que se deseja, multiplica-se a sua potência 250 W por 16 h, isso resulta em uma potência de 4000 Wh, conforme pode ser observado na Eq. 6.

$$\begin{aligned} \text{Consumo}_{carga} &= \text{Potência}_{carga} \times \text{Tempo} \\ \text{Consumo}_{carga} &= 250 \text{ W} \times 16 \text{ h} \\ \text{Consumo}_{carga} &= 4000 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (6)$$

Antes de ser definido a potência que a carga irá demandar dentro do período predefinido, é atribuído um fator de correção, pois se faz necessário levar em conta o fato do inversor e das baterias possuírem uma eficiência, que varia de 80% a 90% para o inversor e 75% para as baterias, segundo os fabricantes. Com um fator de correção adotado de 0,8 para as baterias e de 0,8 para o inversor, calcula-se o produto entre ambos, que resulta em um fator de correção final de que irá dividir a carga de 4000 Wh, conforme pode ser verificado na Eq. 7.

$$\begin{aligned} \text{Consumo}_{corrigido} &= \frac{\text{Consumo}_{carga}}{\text{Coe}f_{baterias} \times \text{Coe}f_{inversor}} \\ \text{Consumo}_{corrigido} &= \frac{4000 \text{ Wh}}{0,64} \\ \text{Consumo}_{corrigido} &\simeq 6250 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (7)$$

Outro ponto importante é a definição da energia armazenada no banco de baterias, pois deve-se considerar uma profundidade de descarga das baterias, que nada mais é que o percentual máximo de consumo das baterias sem que elas recebam recarga, isso garante um melhor desempenho e uma maior vida útil para esses equipamentos, conforme pode ser observado

na Tab. 4. Os fabricantes recomendam uma profundidade de descarga na faixa de 20% a 30% da sua capacidade nominal.

Tabela 4 – Vida útil das baterias em função da profundidade de descarga.

VIDA ÚTIL EM FUNÇÃO DA DESCARGA		
Profundidade de descarga	Número de ciclos	Vida útil em anos
10%	>2000	>5,47
20%	2000	5,47
30%	1150	3,15
40%	700	1,91
50%	450	1,23
60%	280	0,76
70%	190	0,52
80%	100	0,27

Fonte: O autor.

O projeto tem uma profundidade de descarga definida em 30%, isso quer dizer que com a autonomia considerada de de 48 h ou dois dias, será consumido 15% da capacidade nominal do banco de estocagem a cada 24 h ou um dia, isso considerando que nesse período não haverá um carregamento. A partir desse ponto é definida a energia armazenada do sistema, a partir da divisão da potência obtida no consumo corrigido que é de 6666,67 Wh por 0,3 que representa a profundidade de descarga definida, conforme pode ser observado na Eq. 9.

$$Energia_{armazenada} = \frac{Consumo_{corrigido}}{Profundidade_{descarga}} \quad (8)$$

$$Energia_{armazenada} = \frac{6250 \text{ Wh}}{0,3}$$

$$Energia_{armazenada} \simeq 20833,33 \text{ Wh}$$

Com a quantidade de energia armazenada definida, é necessário que seja realizada a conversão de Wh para Ah, pois é com essa unidade que as baterias são especificadas. Logo, a capacidade do banco de baterias em Ah é obtida através da divisão da energia armazenada que é de 22222,22 Wh por 24 V, conforme pode ser observado na Eq. 9. Apesar de as baterias possuírem tensão de 12 V é conveniente se trabalhe com o sistema em 24 V, pois isso irá reduzir a corrente total, para isso são associadas duas baterias de 12 V em série, essa definição pode ser observada na Eq.10.

$$Capacidade_{banco} = \frac{Energia_{armazenada}}{Tensão_{banco}} \quad (9)$$

$$Capacidade_{banco} = \frac{20833,33 \text{ Wh}}{24 \text{ V}}$$

$$Capacidade_{banco} \simeq 868,05 \text{ Ah}$$

$$Baterias_{serie} = \frac{Tensão_{banco}}{Tensão_{bateria}}$$

$$Baterias_{serie} = \frac{24 V}{12 V}$$

$$Baterias_{serie} = 2$$
(10)

Na sequência, a quantidade de baterias em paralelo é definida dividindo a capacidade do banco de baterias pela capacidade de cada bateria em Ah, conforme pode ser visto na Eq. 11. Para fins de cálculo, será trabalhado com um modelo de bateria de 244 Ah nominal, porém não é possível considerar todos os 244 Ah, pois para esse valor as baterias precisam ser descarregadas ao longo de 100 h, o que pode ser visto na Tab. 5. A variação da capacidade de fornecimento de corrente em função do tempo de descarga é uma característica comum das baterias, pois quanto mais rápido for o descarregamento, menos corrente a bateria terá condições de fornecer, sendo assim é empregado a capacidade referente a um descarregamento em 20 h, que é o que mais se aproxima da realidade do projeto, ou seja, 220 Ah. Por fim, é definida a quantidade total de baterias, conforme pode ser visto na Eq. 12, multiplicando o número de baterias em série pelo número de baterias em paralelo.

$$Baterias_{paralelo} = \frac{Capacidade_{banco}}{Capacidade_{bateria}}$$

$$Baterias_{paralelo} = \frac{868,05 Ah}{220 Ah}$$

$$Baterias_{paralelo} \simeq 4$$
(11)

$$Quantidade_{baterias} = Baterias_{serie} \times Baterias_{paralelo}$$

$$Quantidade_{baterias} = 2 \times 4$$

$$Quantidade_{baterias} = 8$$
(12)

Tabela 5 – Características técnicas de uma bateria em relação a velocidade de descarga.

MODELO	12MF45	12MF55	12MF220
Tensão Nominal (V)	12	12	12
10h - 1,75V/Elem	41	50	195
Capacidade a 25°C (Ah)			
20h - 1,75V/Elem	45	55	220
100h - 1,75V/Elem	50	60	244

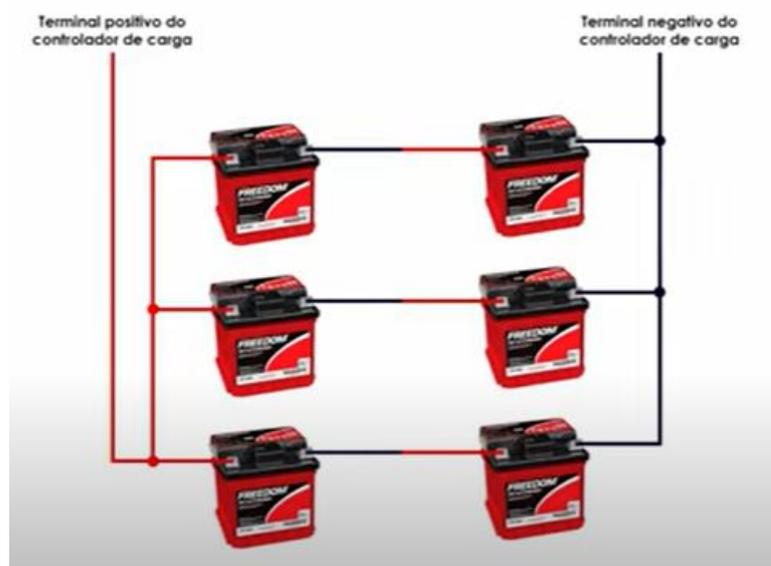
Fonte: O autor.

### 3.3.2 Associação entre baterias que compõe um banco de armazenamento

Para fazer a ligação em série das baterias que fazem parte do banco de armazenamento é necessário unir o polo positivo de uma bateria com o negativo da outra, isso resultará em uma tensão de 24 V medida entre os polos negativo e positivo restantes das baterias associadas, visto que cada uma possui uma tensão nominal de 12 V. Em seguida, os pares de baterias que foram ligados em série precisam ser associados em paralelo, para isso se faz necessário a união dos polos positivos e a união dos polos negativos, isso faz com que as capacidades de corrente de todos os pares sejam somadas.

Com a associação série-paralelo realizada entre as baterias que vão compor o banco de armazenamento, basta ligar o conjunto a fonte de carregamento. Um ponto importante a ser considerado é garantir um processo de carga e descarga balanceado das baterias que fazem parte do banco de armazenamento, pois ligar o sistema diretamente na primeira fileira pode acarretar em uma desproporção de carga e descarga entre as baterias que fazem parte do sistema, para isso é indicado que a ligação seja feita no polo positivo da primeira fileira e posteriormente no polo negativo da última fileira, ou ao contrário, isso irá garantir uma melhor distribuição no processo de carregamento e descarregamento das baterias. O resultado final pode ser observado na Fig. 37.

Figura 37 – Ligação de baterias em paralelo com distribuição de carga balanceada.



Fonte: O autor.

Por fim, é importante salientar que esse dimensionamento pode ser feito de forma proporcional, o que fica claro é que quanto maior a carga ligada ao banco de armazenamento e o tempo de autonomia que desejado, maior será a exigência de corrente, conseqüentemente um número maior de baterias terá que ser instalado.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 ENSAIOS COM CARGA LIGADA AO BANCO DE BATERIAS

A partir dos ensaios realizados com as cargas, e com o recurso do sistema de monitoramento desenvolvido, é possível realizar comparações com as projeções teóricas anteriormente definidas, para que dessa forma seja estabelecido com precisão a capacidade do banco de baterias necessária para garantir uma autonomia de 48 h para o refrigerador de 250 W. Foram realizados dois ensaios, o primeiro com um ventilador de motor monofásico 55 W e o segundo com o refrigerador de 250 W, vale ressaltar que cada ensaio inicia-se com 100% da capacidade do banco de baterias, que fica isolado de qualquer possibilidade de recarga durante o teste, ou seja, o sistema de armazenamento é desconectado do sistema de geração, para garantir que seja simulada uma situação em que as baterias fiquem fornecendo energia sem receberem recarga. Com esses dois testes pretende-se não só definir a capacidade do acumulador de carga para o refrigerador, mas também verificar se o tempo de autonomia se dá de forma proporcional para cargas menores. O sistema estudado é projetado para operar com uma profundidade de descarga de 30% e esse percentual é avaliado de acordo com a tensão medida na bateria. A Tab. 6 apresenta a relação de tensão e profundidade de descarga segundo dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 6 – Percentual de descarga em relação a tensão medida na bateria.

TENSÃO	% DESCARGA
12,6 V	0%
12,5 V	7,5%
12,4 V	15%
12,3 V	22,5%
12,2 V	30%
12,1 V	37,5%
12,0 V	45%

Fonte: O autor.

Vale ressaltar que para o sistema estudado são usadas duas baterias de 12 V cada, ligadas em série, portanto tendo como resultado de saída uma tensão teórica de 24 V, o aumento da tensão tem como objetivo a diminuição da corrente gerada pela carga. Com base na Tab. 6 é possível determinar que para duas baterias ligadas em série temos 0% de descarga a 25,2 V e 30% de descarga a 24,4 V, uma vez que a profundidade de descarga máxima definida é de 30%, essa será a faixa de análise.

## 4.1.1 Ensaio com ventilador 55 W.

Para iniciar o ensaio, se faz necessário determinar de forma teórica o tempo de autonomia para o sistema que possui as características abaixo:

- Tensão do banco de armazenamento 24 V
- Capacidade do banco 60 Ah
- Potência da carga aplicada 55 W
- Coeficiente de rendimento das baterias 0,8
- Coeficiente de rendimento do inversor 0,8
- Profundidade de descarga de 30%

Calculando resulta em:

$$\text{Tempo} = \frac{\text{Capacidade}_{\text{banco}} \times \text{Tensão}_{\text{banco}} \times \text{Profundidade}_{\text{descarga}} \times \text{Coef}_{\text{baterias}} \times \text{Coef}_{\text{inversor}}}{\text{Potência}_{\text{carga}}}$$
$$\text{Tempo} = \frac{60 \text{ Ah} \times 24 \text{ V} \times 0,3 \times 0,8 \times 0,8}{55 \text{ W}}$$
$$\text{Tempo} \simeq 300 \text{ min ou } 5 \text{ h}$$
(13)

Com a referência teórica determinando 300 min de autonomia, conforme pode ser observado na Eq.13, enfim o gráfico de descarga do banco de baterias para esse primeiro ensaio pode ser comparado. A Fig. 38 demonstra o comportamento da tensão do banco de baterias ao ser exigido por um ventilador com motor monofásico de 55 W.

Figura 38 – Ensaio motor monofásico ventilador 55 W.



Fonte: O autor.

O tempo de autonomia atingido nesse primeiro ensaio foi de 290 min, que apesar de menor, ainda sim é um tempo muito próximo ao estabelecido através dos cálculos. Na Fig. 39 a evolução da profundidade de descarga pode ser observada, a medida em que a tensão do banco de armazenamento vai diminuindo.

Figura 39 – Percentual de profundidade de descarga ao longo do tempo para o ensaio com ventilador 55 W.



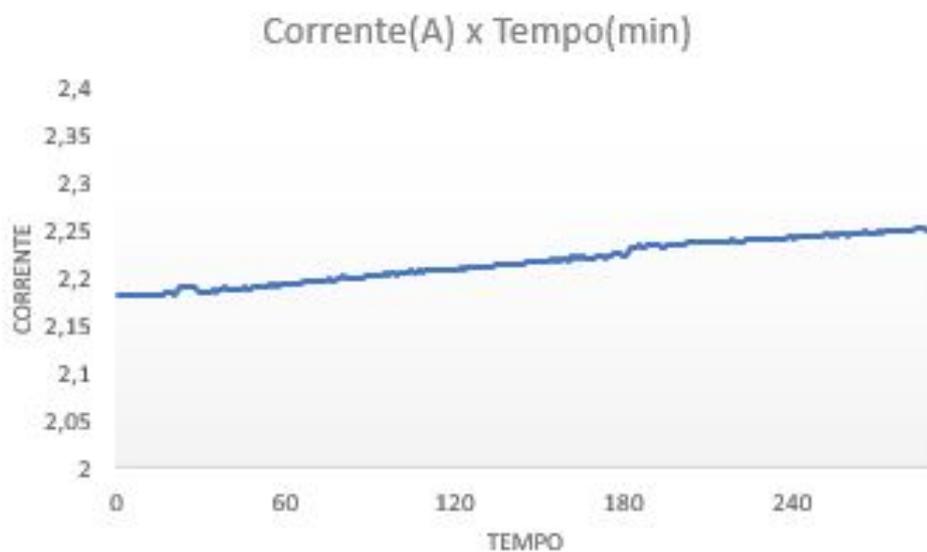
Fonte: O autor.

A corrente medida durante o ensaio apresentou um comportamento esperado, pois a medida em que a tensão do banco baixa, a corrente por sua vez tende a aumentar, para fins de cálculo comprobatório pode-se utilizar um valor intermediário de tensão, com por exemplo, 24,6 V que fica entre o valor máximo e mínimo de tensão de trabalho do banco de armazenamento. Calculando resulta em:

$$\begin{aligned} \text{Corrente}_{carga} &= \frac{\text{Potência}_{carga}}{\text{Tensão}_{banco}} \\ \text{Corrente}_{carga} &= \frac{55 \text{ W}}{24,6 \text{ V}} \\ \text{Corrente}_{carga} &\simeq 2,23 \text{ A} \end{aligned} \tag{14}$$

Pode-se observar na Fig. 40, que o valor de corrente encontrado na Eq. 14 a partir de um valor entre o máximo e mínimo de tensão do banco de armazenamento fica localizado na parte central do gráfico, ou na metade do período de ensaio.

Figura 40 – Corrente ao longo do tempo para o ensaio com ventilador 55 W.



Fonte: O autor.

#### 4.1.2 Ensaio com geladeira 250 W.

Para o segundo ensaio, mais uma vez é determinado de forma teórica o tempo de autonomia para o sistema que possui as características abaixo:

- Tensão do banco de armazenamento 24 V

- Capacidade do banco 60 Ah
- Potência da carga aplicada 250 W
- Coeficiente de rendimento das baterias 0,8
- Coeficiente de rendimento do inversor 0,8
- Profundidade de descarga de 30%

Calculando resulta em:

$$\text{Tempo} = \frac{\text{Capacidade}_{\text{banco}} \times \text{Tensão}_{\text{banco}} \times \text{Profundidade}_{\text{descarga}} \times \text{Coef}_{\text{baterias}} \times \text{Coef}_{\text{inversor}}}{\text{Potência}_{\text{carga}}}$$

$$\text{Tempo} = \frac{60 \text{ Ah} \times 24 \text{ V} \times 0,3 \times 0,8 \times 0,8}{250 \text{ W}}$$

$$\text{Tempo} \simeq 66 \text{ min ou } 1,1 \text{ h}$$

(15)

Com a referência teórica determinando 66 min de autonomia, conforme pode ser observado na Eq.15, enfim o gráfico de descarga do banco de baterias para o segundo e principal ensaio pode ser comparado. A Fig. 41 demonstra o comportamento da tensão do banco de baterias ao ser exigido pelo refrigerador com motor monofásico de potência de 250 W.

Figura 41 – Ensaio motor monofásico refrigerador 250 W.



Fonte: O autor.

O tempo de autonomia atingido no segundo ensaio foi de 54 min, um tempo significativamente menor que o estabelecido através dos cálculos. Na Fig. 42 a evolução da profundidade de descarga pode ser observada, a medida em que a tensão do banco de armazenamento vai diminuindo.

Figura 42 – Percentual de profundidade de descarga ao longo do tempo para o ensaio com refrigerador 250 W.



Fonte: O autor.

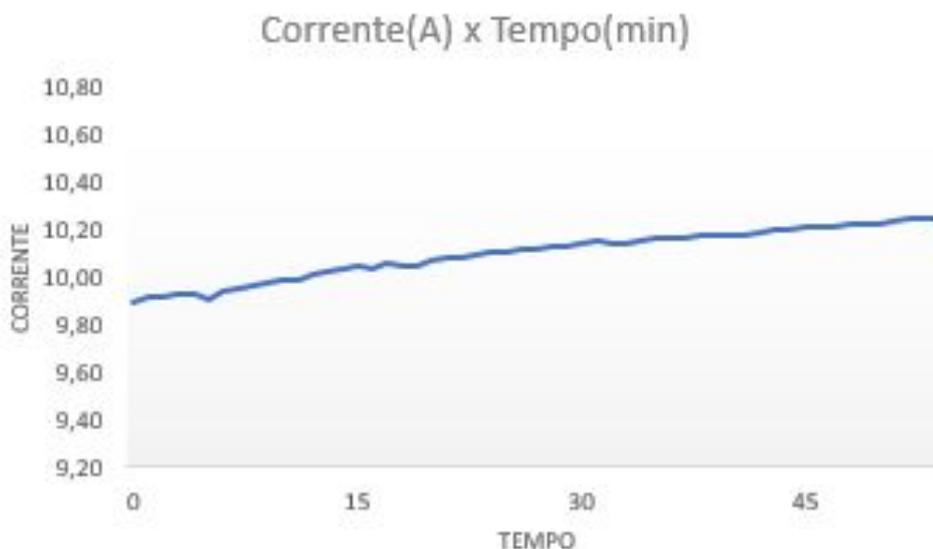
Mais uma vez a corrente medida durante o ensaio apresentou um comportamento esperado, pois a medida em que a tensão do banco baixa, a corrente por sua vez tende a aumentar, para fins de cálculo comprobatório novamente utiliza-se um valor intermediário de tensão, 24,6 V que fica entre o valor máximo e mínimo de tensão de trabalho do banco de armazenamento.

Calculando resulta em:

$$\begin{aligned} \text{Corrente}_{carga} &= \frac{\text{Potência}_{carga}}{\text{Tensão}_{banco}} \\ \text{Corrente}_{carga} &= \frac{250 \text{ W}}{24,6 \text{ V}} \\ \text{Corrente}_{carga} &\simeq 10,16 \text{ A} \end{aligned} \tag{16}$$

Pode-se observar na Fig. 43, que a corrente encontrada na Eq. 16 a partir de um valor entre o máximo e mínimo de tensão do banco de armazenamento fica localizado bem próximo ao centro do gráfico, mais precisamente na metade do período de ensaio.

Figura 43 – Corrente ao longo do tempo para o ensaio com refrigerador 250 W.



Fonte: O autor.

#### 4.1.3 Constatações referentes aos ensaios realizados.

Foi possível evidenciar características muito importantes referentes ao comportamento do banco de baterias exigido por diferentes cargas. Na primeira simulação foi aplicada uma carga de um motor monofásico de 55 W e pode ser percebido um comportamento bem mais linear em relação ao declínio de tensão que se dá ao longo do tempo, inclusive o período de autonomia alcançado apesar de mais baixo, ficou muito próximo proporcionalmente falando do tempo estabelecido no dimensionamento através do cálculo. Já no ensaio com o refrigerador que possui um motor monofásico de 250 W, o comportamento da descarga do banco de baterias foi muito menos linear, além do fato de que a diferença entre o tempo projetado e o tempo obtido ter sido proporcionalmente muito maior. Esses fatos podem ser atribuídos a velocidade de descarga do banco de armazenamento, uma condição que já foi pontuada nesse trabalho. Resumidamente quanto mais rápido for a descarga da bateria ou do banco de baterias, menor será a sua eficiência, isso ficou bem claro no acompanhamento dos gráficos de tensão ao longo dos períodos de teste. Por fim, conclui-se que para um refrigerador com motor monofásico de 250 W manter-se a pleno funcionamento por um período de 48h com uma boa eficiência por parte de banco de baterias, são necessários pelo menos 868,05 Ah de capacidade de armazenamento, conforme o definido na projeção teórica.

## 4.2 ANÁLISE DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.

Por tratar-se de um trabalho que se propôs a realizar análises em função de medições realizadas, se faz necessário a verificação das incertezas envolvidadas nos dados coletados. Nesse trabalho foi utilizado o ESP32 ponto central no processo de aquisição de dados, esse hardware possui uma resolução de 12 bits, o que quer dizer para uma tensão lida pela entrada ADC o valor é dividido em 4096 partes. Segundo dados do fabricante, os chips ESP32 podem apresentar até  $\pm 0,75\%$  de incerteza para as condições que foram aplicadas nesse projeto, logo pode-se ter uma diferença de até  $\pm 25$  mV considerando a tensão limite de operação da entrada ADC que é 3,3 V.

### 4.2.1 Propagação de erros.

Segundo (DIAS, 2015), para cada variável V relacionada a uma leitura m existe um intervalo de incerteza w, dado por  $V = m \pm w$ . Vuolo (1999) apud (DIAS, 2015), define que medidas associadas ao fundo de escala de um equipamento de medição, possuem o desvio máximo possível. Variáveis obtidas através da combinação de outras variáveis, recebem o nome de incertezas combinadas  $w_r$ , sendo representadas segundo as suas relações, como pode ser observado nas Eq. 17,18 e 19.

$$(A \pm a) \pm (B \pm b) \rightarrow w_r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (17)$$

$$(A \pm a) \pm (B \pm b) \rightarrow w_r = AB \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2} \quad (18)$$

$$(A \pm a) \pm (B \pm b) \rightarrow w_r = \frac{B}{A} \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2} \quad (19)$$

Ao considerar a função  $V = f(x_1 \dots x_n)$ , Kleine e MCClinton apud (DIAS, 2015) a Eq. 20 define a incerteza combinada.

$$w_r = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial V}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (20)$$

### 4.2.2 Incertezas nas medidas de correntes contínuas.

Para a realização das medidas de corrente contínua foi utilizado o sensor ACS-712, esse sensor possui uma incerteza de  $\pm 1,5\%$ , a outra incerteza a se considerar é a do ADC da ESP32 de  $\pm 0,75\%$ , esses dois percentuais são aplicadas na Eq. 21 resultando na incerteza combinada  $w_i = \pm 1,68\%$ . Nessa atividade foram realizadas duas leituras de corrente ao longo dos ensaios

sendo a primeira de  $\simeq 2,2$  A, para o ventilador monofásico de 55 W e a segunda de  $\simeq 10,2$  A, para o refrigerador de motor monofásico de 250 W, representando uma incerteza possível de  $(10,2 \pm 0,2)$  A e  $(2,20 \pm 0,04)$  A.

$$w_i = \sqrt{w_{ESP32}^2 + w_{ACS}^2} \quad (21)$$

#### 4.2.3 Incertezas nas medidas de tensões contínuas.

Para a realização das medidas de tensão contínua foi utilizado o sensor DC 0 - 25 V 2281, este sensor possui uma incerteza de  $\pm 1,5\%$ , outra incerteza a ser considerada é a do ADC da ESP32 de  $\pm 0,75\%$ , esses dois percentuais são aplicadas na Eq. 22 resultando na incerteza combinada  $w_{Vcc} = \pm 1,68\%$ . As tensões mínima e máxima lidas no decorrer dessa atividade foram 12,2 V e 12,6 V respectivamente, logo a incerteza para a menor tensão fica em  $(12,2 \pm 0,2)$  V e para a maior tensão em  $(12,6 \pm 0,2)$  V.

$$w_{Vcc} = \sqrt{w_{ESP32}^2 + w_{2281}^2} \quad (22)$$

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração de energia elétrica a partir da conversão da energia emitida pelo sol é um recurso cada vez mais utilizado, o número de usinas com esse princípio de geração vem crescendo de uma forma muito rápida nos últimos anos, e as expectativas futuras são de que cada vez mais essa tecnologia seja difundida, visto que os benefícios evidenciados até então são muito animadores, até mesmo a nível de investimento. A produção de uma energia considerada limpa com um investimento que tende a ser recuperado no médio prazo, torna sistemas de geração fotovoltaicos um produto altamente aceito no mercado atual e isso pode ser atribuído ao fato de que os processos de geração de energia convencionais sempre foram conhecidos por serem caros e causar grande impacto ambiental. Todas essas vantagens fazem com que cada vez mais trabalhos voltados para pesquisas nessa área sejam elaborados, pois quanto mais for entendido a respeito dessa tecnologia, mais possibilidades surgirão no futuro, tornando a aplicação desse tipo de usina cada vez mais atrativo.

Esse trabalho se propôs a desenvolver uma pesquisa voltada para o dimensionamento de um banco de armazenamento de energia para um sistema isolado, essa versão de sistema é objeto de muitos estudos, pois a autonomia total de energia é sem dúvidas algo muito interessante, porém atualmente é algo economicamente inviável o que acaba restringindo a sua aplicação, como pode ser observado durante os testes realizados e também nos trabalhos que foram utilizados como referência. Durante os ensaios práticos com as cargas ligadas ao banco de baterias, verificou-se um comportamento muito próximo dos resultados projetados de forma teórica, porém cabe ressaltar que aspectos como profundidade de descarga e coeficientes de eficiência das baterias e do inversor, acabam impactando muito na autonomia proporcionada pelo banco, por esse motivo, esses fatores devem ser estabelecidos de forma precisa na elaboração de um projeto, para que os resultados fiquem dentro do esperado.

A implementação do sistema de monitoramento foi de grande utilidade para o desenvolvimento da pesquisa, visto que possibilitou a coleta e o tratamento adequado dos dados envolvidos nos experimentos, fazendo com que fosse possível evidenciar os resultados de uma forma mais clara e prática. Por fim, o desenvolvimento de uma página web capaz de exibir a consolidação dos dados relevantes do sistema foi uma experiência que agregou conhecimentos que serão muito relevantes no futuro, visto que cada vez mais os processos de diversas áreas aderem a modelos de internet das coisas, no intuito de cada vez mais consolidar e tratar informações de uma forma prática, além de tornar todos esses dados mais acessíveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Implementar um algoritmo de correção de erros de leituras, com o objetivo de tornar as informações mais confiáveis e estáveis, pois a não linearidade no processo de leitura da entrada AD da ESP32, somada aos erros dos sensores utilizados, faz com que o processo de coleta de dados seja mais difícil e não tão preciso.
- Desenvolver um layout mais elaborado para o sistema supervisorio, com imagens que possam não só transmitir dados, mas também passar a ideia da estrutura da microrrede isolada, de forma a criar uma interface ainda mais explicativa, com o objetivo de tornar a experiência do usuário muito mais informativa.
- Desenvolver a possibilidade de o usuário não só visualizar as informações referentes ao funcionamento da microrrede isolada, mas também que possa interagir com o sistema, através de comandos pelo supervisorio web.
- Criar a possibilidade de que o sistema supervisorio possa ser acessado através de qualquer rede, não ficando assim o acesso limitado a rede em que o ESP32 está conectado.

## REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. *Sinergia, São Paulo*, v. 15, n. 4, p. 311–318, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- ALVES, M. d. O. L. Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 12, 24 e 25.
- BLOCKER, P. C. Aproveitamento inteligente de energia solar. Universidade Federal Fluminense, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- CÂMARA, C. F. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. *Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG*, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- CARNEIRO, J. A. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. 2009. Citado na página 26.
- DIAS, R. M. Instalação de uma microrrede fotovoltaica conectada/isolada com estocagem e monitoramento com controle da carga alimentada. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015. Citado 12 vezes nas páginas 19, 20, 22, 23, 25, 28, 30, 31, 33, 34, 35 e 61.
- FREITAS, S. S. A. *Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos*. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, 2008. Citado 9 vezes nas páginas 12, 17, 18, 21, 22, 23, 26, 28 e 29.
- HOHMANN, M.; OLIVEIRA, A. K. V. de; RÜTHER, R. Análise de viabilidade técnica da utilização de baterias de segunda vida retiradas de veículos elétricos. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- INHAQUITES, M. M. *et al.* Caracterização da resposta temporal e angular de piranômetro térmico com radiação solar natural. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- LANA, L. T. C. *et al.* Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. *Engenharias On-line*, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 21, 26, 27 e 29.
- MARQUES, R. C.; KRAUTER, S. C.; LIMA, L. C. de. Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. *Revista Tecnologia*, v. 30, n. 2, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- MATOS, D.; CATALÃO, J. Geração distribuída e os seus impactes no funcionamento da rede elétrica: Parte 2. *Potência*, v. 1, n. 2, p. 3, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 16.
- SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M. Geração distribuída versus centralizada. *m*, Instituto Politécnico de Viseu, 2008. Citado na página 16.
- SEVERINO, M. M.; CAMARGO, I. M. d. T.; OLIVEIRA, M. A. G. d. Geração distribuída: discussão conceitual e nova definição. Sociedade Brasileira de Planejamento Estratégico (SBPE), 2008. Citado na página 15.
- VALENTE, I. A. S. *Integração de bancos de baterias em redes elétricas isoladas*. Tese (Doutorado), 2015. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

ZILLES, R. Energia solar fotovoltaica. *USP, São Paulo*, 2012. Citado na página 17.

## ANEXO A – CÓDIGO DO ALGORÍTIMO DO CONTROLADOR.

```
#include <WiFi.h>

const char* ssid = "Tiago Kondra";
const char* password = "tiago20016";

WiFiServer server(80);
WiFiClient client;
String tensao01_32, tensao02_34, corrente_36, tensao_sistema, percentual_carga,
autonomia_restante;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);   pinMode(36, INPUT);
  pinMode(34, INPUT);
  pinMode(32, INPUT);
  delay(10);

  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);

  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
```

```
    Serial.print(".");
}

    Serial.println();
    Serial.println("WiFi connected.");
    Serial.println("IP address: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());

    server.begin();
}

void loop()
{
    atualizaLeiturasADC();
    client = server.available();

    if (client)
    {
        Serial.println("New Client.");
        String currentLine = "";

        while (client.connected())
        {
            if (client.available())
            {
                char c = client.read();
                Serial.write(c);

                if (c == '\n')
                {
                    if (currentLine.length() == 0)
                    {
```

```
        client.println(F("HTTP/1.1 200 OK"));
        client.println(F("Content-type:text/html"));
        client.println();
        enviaHTMLPagina1();
        client.println();
        break;
    }
    else
    {
        currentLine = "";
    }

    else if (c != '\r')
    {
        currentLine += c;
    }
}
}
client.stop();
Serial.println("Client Disconnected.");
}
}

void atualizaLeiturasADC()
{
    tensao01_32 = String((analogRead(32)/(2986/12.6)));
    tensao02_34 = String((analogRead(34)/(2994/12.6)));
    tensao_sistema = String((analogRead(32)/(2986/12.6))+
(analogRead(34)/(2994/12.6)));
    corrente_36 = String(analogRead(36));
    percentual_carga = String(100);
    autonomia_restante = String(297);
```

```
Serial.print(tensao01_32);
Serial.print(",");
Serial.print(tensao02_34);
Serial.print(",");
Serial.print(tensao_sistema);
Serial.print(",");
Serial.print(corrente_36);
Serial.print(",");
Serial.print(percentual_carga);
Serial.print(",");
Serial.println(autonomia_restante);
delay(3000);
}

void enviaHTMLPagina1()

client.println(F(«html lang=\ "pt-br\»"));
client.println(F(«head>"));
client.println(F(«meta charset=\ "utf-8\»"));
client.println(F(«meta http-equiv= \ "refresh\ "content=\ "3\";>"));
client.println(F(«title>Supervisorio web</title>"));
client.println(F(«/head>"));
client.println(F(«body>"));
client.println(F(«h1>Tensão da bateria 01</h1>"));
client.print(tensao01_32); client.println(F("V"));
client.println(F(«h1>Tensão da bateria 02</h1>"));
client.print(tensao02_34); client.println(F("V"));
client.println(F(«h1>Tensão do sistema</h1>"));
client.print(tensao_sistema); client.println(F("V"));
client.println(F(«h1>Corrente do sistema</h1>"));
```

```
client.print(corrente_36); client.println(F("A"));
client.println(F(«h1>Percentual de carga do banco de baterias</h1>"));
client.print(percentual_carga); client.println(F("%"));
client.println(F(«h1>Tempo de autonomia restante à carga constante</h1>"));
client.print(autonomia_restante); client.println(F("min"));
client.println(F(«/body>"));
client.println(F(«/html>"));
```