

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

DIEGO ROHLER

**CARACTERIZAÇÃO DE UM ACUMULADOR HIDRÁULICO PARA
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

CERRO LARGO

2021

DIEGO ROHLER

**CARACTERIZAÇÃO DE UM ACUMULADOR HIDRÁULICO PARA
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Cassol

CERRO LARGO

2021

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Rohleder, Diego
CARACTERIZAÇÃO DE UM ACUMULADOR HIDRÁULICO PARA
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA/ Diego
Rohleder. -- 2021.
78 f.:il.

Orientador: Doutor Fabiano Cassol

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro
Largo, RS, 2021.

1. Fontes renováveis. 2. Sustentabilidade. 3.
Energia solar fotovoltaica. 4. Armazenamento de energia
I. Cassol, Fabiano, orient. II. Universidade Federal da
Fronteira Sul. III. Título.

DIEGO ROHLER

**CARACTERIZAÇÃO DE UM ACUMULADOR HIDRÁULICO PARA
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

20/ 05/ 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fabiano Cassol

Orientador



Prof1. Dr. Mario Sergio Wolski



Prof2. Dr. Thiago de Cacio Luchese

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir a vida e o aprendizado diário.

A Universidade Federal Da Fronteira Sul e ao campus Cerro Largo/RS, pela oportunidade de execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Fabiano Cassol, pela orientação e pelo apoio para que eu realizasse este trabalho.

A minha família, especialmente aos meus pais, por me propiciarem uma boa educação e sempre incentivarem meu crescimento profissional.

Aos colegas e professores dessa incrível jornada que tornaram essa experiência importante e especial na minha carreira profissional e minha vida pessoal.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste estudo.

Muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo referente à estrutura de acumulação de energia e análise do desempenho de um sistema para acumulação de energia, a partir da fonte solar fotovoltaica. Também são apresentados conceitos sobre o aproveitamento e a geração de energia advindas de fontes renováveis e os possíveis sistemas de armazenamento de energia elétrica. Para a análise do sistema proposto, foi construído um protótipo capaz de bombear e elevar um volume de água, sendo posteriormente utilizado para gerar energia elétrica através da utilização de uma turbina hidráulica. Foram realizadas medições para o sistema comparando valores de tensão e corrente tanto para bombeamento de água quanto para a geração de energia. Após os experimentos realizados observou-se que os valores de energia necessários para a realização da operação de bombeamento de água foram superiores aos encontrados na geração de energia a partir da turbina hidráulica, resultando em uma eficiência de 1,7%, demonstrando assim a necessidade de otimização no sistema de geração de energia proposto.

Palavras-chave: Fontes renováveis. Sustentabilidade. Energia solar fotovoltaica. Armazenamento de energia.

ABSTRACT

This work presents a study regarding the structure of energy accumulation and its analysis, based on the performance of an energy accumulation system, from the photovoltaic solar source. Concepts on the use and generation of energy from renewable sources and possible electrical energy storage systems are also presented. For the analysis of the proposed system, a prototype was built capable of pumping and raising a volume of water, being subsequently used to generate electrical energy through the use of a hydraulic turbine. Measurements were made for the system comparing voltage and current values for both water pumping and power generation. After carried experiments out, it was observed that the energy values needed to water pumping operation were higher than those found in the generation of energy from the hydraulic turbine, resulting in an efficiency of 1.7%, thus demonstrating the necessity of optimization in the proposed power generation system.

Keywords: Renewable sources. Sustainability. Photovoltaic solar energy. Energy storage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta Interna de Energia no Brasil – 2019 (%).....	17
Figura 2 - Oferta Interna de Energia elétrica no Brasil – 2019 (%).....	19
Figura 3 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.....	27
Figura 4 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	28
Figura 5 - Célula fotovoltaica de silício cristalino.....	28
Figura 6 – Curva característica de células conectadas em série.....	29
Figura 7 - Curva Característica IxV de células conectadas em paralelo.....	30
Figura 8 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino.....	30
Figura 9 - Célula, módulo e painel fotovoltaico.....	31
Figura 10 - Representação de um sistema fotovoltaico isolado.....	33
Figura 11 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.....	33
Figura 12 - Diagrama de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.....	34
Figura 13 - Componentes básicos de uma usina hidrelétrica reversível.....	42
Figura 14 - Usina hidrelétrica reversível.....	43
Figura 15 - Usina hidrelétrica reversível de Elba, na Alemanha.....	43
Figura 16 - Capacidade mundial instalada de armazenamento de energia elétrica.....	44
Figura 17 - Quadro comparativo entre as diferentes tecnologias de armazenamento.....	45
Figura 18 - Esquema do protótipo.....	46
Figura 19 – Protótipo.....	48
Figura 20 - Painel solar fotovoltaico.....	49
Figura 21 - Regulador de tensão.....	49
Figura 22 - Sistema de bombeamento do protótipo.....	50
Figura 23 - Modelo de bomba utilizado.....	51
Figura 24 - Unidade de bombeamento do sistema.....	51
Figura 25 - Bombas de água na unidade de bombeamento do sistema.....	52
Figura 26 - Reservatório inferior.....	53
Figura 27 - Reservatório superior.....	53
Figura 28 - Gerador hidráulico do protótipo.....	54
Figura 29 - Sistema de geração de energia elétrica do protótipo.....	55
Figura 30 - Válvula de acionamento do sistema de Geração.....	56
Figura 31 - Modelo de voltímetro do sistema de geração.....	57

Figura 32 - Sistema de Geração funcionando.....	58
Figura 33 - Gerador funcionando	58
Figura 34 - Multímetro digital.....	59
Figura 35 - Cronometro digital.....	60
Figura 36 - Reservatório inferior	61
Figura 37 - Regulador de tensão em funcionamento.....	61
Figura 38 - Teste do sistema de geração.....	63
Figura 39 - Potências durante o escoamento por nível de água.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos de bombeamento para estimativa do tempo de recarga	65
Tabela 2 - Tempos de geração elétrica, considerando a descarga do reservatório superior.....	66
Tabela 3 - Tempos de descarga por nível.	67
Tabela 4 - Valores de tensão de cada teste, em volts (V), para a geração de energia.	68
Tabela 5 - Valores de corrente de cada teste, em amperes (A), para a geração de energia.....	68
Tabela 6 - Valores de potência calculados utilizando os valores observados na geração de energia.	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	Justificativa.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	SUSTENTABILIDADE.....	16
2.2	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	17
2.2.1	Hidroeletricidade	18
2.2.2	Energia das marés.....	19
2.2.3	Energia eólica	20
2.2.4	Biomassa.....	20
2.2.5	Hidrogênio.....	21
2.2.6	Energia solar.....	22
2.2.7	Microgeração de energia	22
2.2.8	Vantagens e desvantagens das energias renováveis	23
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	24
2.3.1	Energia solar fotovoltaica no Brasil	24
2.3.2	Legislação em vigor e normas da ABNT	25
2.4	FUNCIONAMENTO E COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	26
2.5	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	35
2.5.1	Volantes de inércia	35
2.5.2	Armazenamento de energia térmica	36

2.5.3 Acumuladores de ar comprimido	36
2.5.4 Baterias	37
2.5.5 Capacitores	38
2.5.6 Hidroacumulação.....	39
3 METODOLOGIA.....	46
3.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA	48
3.2 SISTEMA DE BOMBEAMENTO	50
3.2.1 Acumulo de água.....	52
3.3 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	54
3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	59
3.5 PROCEDIMENTOS ADOTADOS.....	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.2 MEDIÇÕES HIDRÁULICAS PARA O SISTEMA DE BOMBEAMENTO	64
4.3 MEDIÇÕES HIDRÁULICAS REALIZADAS PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO	66
4.3 MEDIÇÕES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS.....	67
4.3.1 Cálculo da Energia consumida e gerada.....	70
4.3.2 Eficiência.....	71
4.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica e a sua disponibilidade demandam responsabilidade em relação à sustentabilidade ambiental. O emprego de ferramentas que permitem um melhor gerenciamento desse recurso, possibilitando a geração e uso mais eficientes, beneficia a humanidade e minimiza danos ao meio ambiente. A demanda por energia elétrica é crescente e a capacidade de garantir o abastecimento de energia elétrica é essencial no desenvolvimento de qualquer economia. O uso racional dos recursos energéticos e ampliação nas opções de fontes energéticas auxiliam no controle de geração e distribuição de energia.

Sendo a energia elétrica um recurso indispensável à sobrevivência e de suma importância no desenvolvimento das civilizações, nos dias atuais as principais nações vêm enfrentando desafios para assegurar o aumento da produção e a qualidade na distribuição de energia. Nessa perspectiva, tem se buscado cada vez mais formas de diversificar as matrizes energéticas, a fim de impulsionar a substituição do uso de combustíveis fósseis por outras fontes consideradas mais limpas, menos nocivas ao meio ambiente e que possibilitem uma geração descentralizada (CALIJURI, 2013).

Com o aumento populacional cada vez mais acentuado, o consumo de energia vem aumentando proporcionalmente e a introdução da tecnologia tem sido empregada com o intuito de trazer melhorias na qualidade de vida das pessoas, enfatizando também as questões ambientais. A problemática dos gases do efeito estufa e do aquecimento global surgiu como uma preocupação mundial e demandou a criação de medidas e estratégias a fim de reduzir as emissões de dióxido de carbono da atmosfera. Assim, cada vez mais as energias renováveis oriundas de fontes de energia consideradas naturais, como a solar fotovoltaica e a eólica, vem sendo incorporadas expressivamente na matriz energética de vários países no mundo. Neste sentido, existem acordos internacionais visando buscar fontes alternativas de produção de energia que não causem, ao menos diminuam, danos ambientais. Um exemplo disso é o Protocolo de Kyoto, que tem por finalidade estabelecer limites de emissão de gases, tentando dentro de suas possibilidades, normatizar a relação entre a produção e o consumo de energia (TOLMASQUIM, 2004).

É importante ressaltar que a aplicação de fontes alternativas de energia como a eólica, a biomassa e a energia solar vêm sendo estudadas no Brasil numa tentativa de diminuir os impactos ambientais. Apesar do custo elevado para produção de energia através dessas fontes alternativas, o país tem investido nessas alternativas como forma eficiente de obtenção energética, sem agredir o meio ambiente e formando uma base para um desenvolvimento sustentável. No ano de 2019 as fontes renováveis ficaram com 83 % de participação na matriz de oferta interna de energia elétrica (MME, 2019).

No Brasil, a principal forma de geração de energia elétrica é a geração hidrelétrica, que representa a maior parcela da geração de energia consumida no país. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (2019), a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis é predominante na matriz de produção de energia do país, sendo a geração de energia proveniente de fontes hídricas responsável por 78,2% da oferta. No entanto, os danos socioambientais causados pela instalação das usinas hidrelétricas, bem como as dificuldades existentes no setor energético, tornam necessária uma maior atenção para as outras fontes de energias renováveis, como a energia solar fotovoltaica.

De acordo com Braga (2018), o Brasil é favorecido por ter bons níveis de radiação solar incidente durante a maior parte do ano e é considerado o país mais avançado no desenvolvimento de tecnologias de energias renováveis da América do Sul.

No período entre 2018 e 2019 a geração solar teve destaque sobre as outras formas de geração de eletricidade, com um aumento de 92,1% na quantidade de eletricidade gerada e referente à capacidade de geração de eletricidade no Brasil, esta foi expandida em 4,5%, e a maior expansão ocorreu na geração solar, com um aumento na potência instalada de 37,6% em relação ao ano de 2018, e neste já havia ocorrido um aumento de quase 100% em relação a 2017 (MME, 2019).

A energia solar é a fonte de energia mais abundante e menos poluente ao ser humano e nunca foi tão aproveitada de forma eficiente quanto as demais formas de energia. Apesar da energia solar ser considerada renovável, possui o inconveniente de ser intermitente e estocástica, tornando o desempenho da geração variável ao longo do dia. Em vista disso, surge a necessidade de técnicas e sistemas que busquem a eficiência em seus sistemas de distribuição e acumulação, para que a energia gerada seja armazenada para ser utilizada em qualquer momento do dia (LOPEZ, 2012).

O armazenamento de energia elétrica pode ser realizado através de diversos processos tecnológicos que utilizam fenômenos físicos e\ou químicos, possibilitando o acúmulo de energia para sua utilização em momentos convenientes. Para este armazenamento podemos citar como principais tecnologias de armazenamento as baterias, o armazenamento de ar comprimido, o armazenamento térmico, a hidroacumulação, os supercapacitores e os volantes de inércia (CHEN, 2009). De acordo com Canales (2015), conhecer os sistemas de geração e de acumulação de energia elétrica possibilita uma observação mais precisa sobre a utilização, geração e armazenamento de energia elétrica, objetivando aumentar a eficiência dos processos envolvidos, reduzir os custos e elevar os níveis de qualidade dos serviços. É o caso do emprego de sistemas que utilizam fontes renováveis para obter e acumular energia elétrica.

Este trabalho apresenta um estudo de investigação, que tem como objetivo caracterizar e avaliar a acumulação e geração de energia em um conjunto solar fotovoltaico e hídrico, através de um sistema que propicia a acumulação de água em um reservatório a partir da energia solar fotovoltaica e outro que é capaz de converter a energia acumulada em energia elétrica. Para a investigação, foi construído um protótipo que simulou um sistema de geração de energia hidrelétrica, fazendo o acúmulo de energia gerada a partir de um painel fotovoltaico e armazenando a energia em forma de energia potencial. Posteriormente, essa energia foi convertida em energia elétrica através de uma turbina hidráulica. No estudo foi observado a quantidade de energia gasta para armazenar um determinado volume de água e da energia gerada a partir deste volume. Com isso pode-se estimar a eficiência do sistema de geração e armazenamento de energia elétrica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva estudar a viabilidade de armazenamento da energia elétrica gerada por fonte solar, na forma de energia potencial, onde o armazenamento de energia elétrica é feito através do acúmulo de água bombeada entre dois reservatórios de cotas diferentes.

O presente estudo visa destacar o processo de acúmulo e armazenamento de energia elétrica de forma mais limpa e sustentável, comparado a outros sistemas de armazenamento, com a finalidade de reduzir os impactos ambientais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar a teoria da geração elétrica por fonte solar;
- Estudar os tipos de sistemas acumuladores de energia;
- Projetar e montar um sistema fechado para bombeamento de água e reaproveitamento para geração de energia elétrica por fonte solar;
- Realizar ensaios e medições para determinar qual a quantidade de energia que poderia ser gerada a partir de um sistema acumulador hidráulico.

1.2 Justificativa

Atualmente existe a necessidade e o intuito de aumentar significativamente a participação de fontes e processos renováveis na produção de eletricidade. Muitas formas de produção de energia não ocorrem de maneira contínua, pois o seu aproveitamento depende de fatores externos e incontroláveis pelo homem, ocasionando períodos desfavoráveis para produção de energia. Um exemplo é a produção de energia solar, cujo aproveitamento depende da irradiação solar, que varia de acordo com as coordenadas geográficas do local e condições climáticas.

O armazenamento de energia elétrica é uma alternativa para tornar estes processos mais eficientes, possibilitando o uso da eletricidade nos períodos em que a geração de eletricidade não acontece ou apresenta dificuldades. O acúmulo de água pode ser utilizado para o armazenamento de energia, o processo é considerado menos nocivo ao meio ambiente e utiliza um recurso natural e renovável presente em todo planeta.

Como o curso de engenharia ambiental e sanitária está alinhado com os princípios da sustentabilidade e as boas práticas ambientais, um estudo sobre armazenamento de energia elétrica de forma mais limpa, pode colaborar para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes no trato ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SUSTENTABILIDADE

Sustentável é um adjetivo para algo que pode ser sustentado, ou seja, algo que é “suportável” e “capaz de ser continuado em um determinado nível”. Desta forma, a sustentabilidade pode ser vista como o processo pelo qual algo é mantido em um determinado nível suportável. Nos dias atuais, a sustentabilidade costuma ser definida como os processos e ações através dos quais a humanidade evita o esgotamento dos recursos naturais, a fim de manter um equilíbrio ecológico que não permite diminuir a qualidade de vida das sociedades modernas (CALIJURI, 2013).

O termo “sustentabilidade” tem sido amplamente aplicado para caracterizar melhorias em áreas como a superexploração de recursos naturais, operações de manufatura (seu uso de energia e subprodutos poluentes), o consumo linear de produtos, a direção dos investimentos, estilo de vida do cidadão, compra do consumidor comportamentos, desenvolvimentos tecnológicos ou mudanças empresariais e institucionais em geral. Enquanto uma ação causar pouco, ou nenhum dano ao mundo natural (sob a crença de que os ecossistemas continuarão operando e gerando as condições que permitem que a qualidade de vida das sociedades modernas de hoje não diminua), esta ação pode ser considerada sustentável (ROSEN, 2008).

Por sua vez, o desenvolvimento sustentável está voltado para uma visão de longo prazo. Na verdade, o desenvolvimento sustentável tem uma definição universalmente aceita que foi escrita pela primeira vez no Relatório Brundtland, escrito em 1987. Ao adicionar o conceito de desenvolvimento, o desenvolvimento sustentável não significa apenas que a humanidade deve satisfazer suas necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de fazer o mesmo, e sim, junto a isso, a ideia de progresso social e um aumento na qualidade de vida em todo o mundo. É por isso que a agenda para 2030 com 17 objetivos sustentáveis (ODS) foi adotada pelos membros da ONU em Nova York em 2015. Entre eles estão objetivos como acabar com a pobreza e a fome, garantir boa saúde e bem-estar para todos, fornecer educação de qualidade e alcançar igualdade de gênero (YUKSEL, 2010).

A sustentabilidade baseia-se na política, economia e filosofia e outras ciências sociais, bem como nas ciências exatas. Ao pensar em energia elétrica a palavra sustentabilidade nos remete a pensar em fontes renováveis de combustível, reduzindo as emissões de carbono, protegendo o meio ambiente e uma forma de manter em equilíbrio os delicados ecossistemas

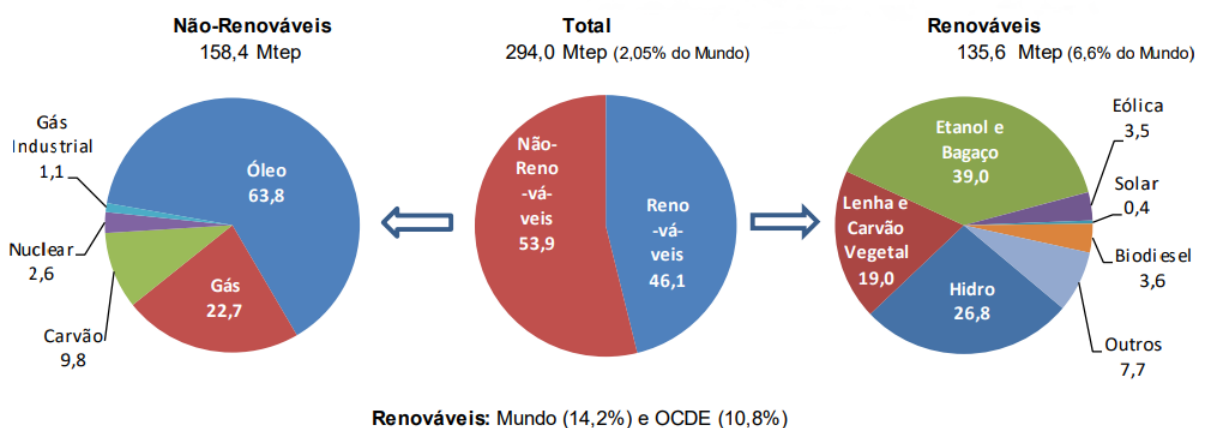
de nosso planeta. Em suma, a sustentabilidade visa proteger nosso ambiente natural, saúde humana e ecológica, ao mesmo tempo em que impulsionamos a inovação e a economia e não comprometemos nosso modo de vida (CALIJURI, 2013).

2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A eletricidade está ao nosso redor, impulsionando a tecnologia como em nossos telefones celulares, computadores, luzes, e condicionadores de ar e nos diversos aparelhos elétricos e eletrônicos presentes no nosso dia a dia. É difícil escapar da utilização de energia elétrica em nosso mundo moderno. Mesmo quando se tenta escapar da eletricidade ela ainda está presente em toda a natureza, e até mesmo dentro de nossos corpos (CARVALHO, 2002).

Fontes de energia são recursos que, ao serem transformadas pelo homem, podem ser utilizadas para gerar algum tipo de energia mecânica ou elétrica a principal característica de uma fonte de energia é a sua eficiência (LOPEZ, 2012). Um exemplo de fonte de energia é a água, onde a força de uma correnteza pode ser convertida em energia mecânica, que posteriormente pode ser convertida em energia elétrica. As fontes energéticas podem ser classificadas como renováveis e não renováveis. A Figura 1 ilustra o gráfico da oferta de energia do Brasil em 2019, levando em conta as principais formas de energia consumida.

Figura 1 - Oferta Interna de Energia no Brasil – 2019 (%)



Fonte: Ministério de minas e energia. (2019).

Energias não renováveis são energias produzidas através de matérias-primas que não são regeneráveis em um curto espaço de tempo. Como exemplo tem-se o carvão, petróleo, gás natural (CALIJURI, 2013). Conforme Lopez (2012), com o início da industrialização a utilização de recursos energéticos não renováveis foi impulsionado. O mesmo autor ainda relata que neste período surgiram as primeiras máquinas a vapor que funcionavam a partir da queima do carvão, madeira, óleo, ou qualquer outro elemento combustível, que por sua vez, transformava energia calorífica em vapor fazendo pressão dentro de tubulações, e assim movimentando rotores, eixos ou turbinas.

Com o crescimento cada vez maior da população e a exploração contínua de fontes energéticas, surgiu a necessidade de sustentabilidade, dando origem ao conceito de desenvolvimento sustentável, que define o equilíbrio entre a ação humana, o desenvolvimento econômico, social e a natureza (ANEEL, 2002).

Diz-se que uma fonte de energia é renovável quando não é possível estabelecer um fim temporal para a sua utilização ou possa ser reestabelecida em um curto espaço de tempo. É o caso do calor emitido pelo sol, da existência do vento, das marés ou dos cursos de água. Elas se caracterizam por serem obtidas de fontes naturais, pela capacidade que têm de se regenerar e, como tal, serem virtualmente inesgotáveis e ainda assim respeitarem o meio ambiente. Assim, exemplos de fontes de energia renovável são: Hidroelétricas, energia das marés, energia eólica, biomassa, hidrogênio, e energia solar (CALIJURI, 2013).

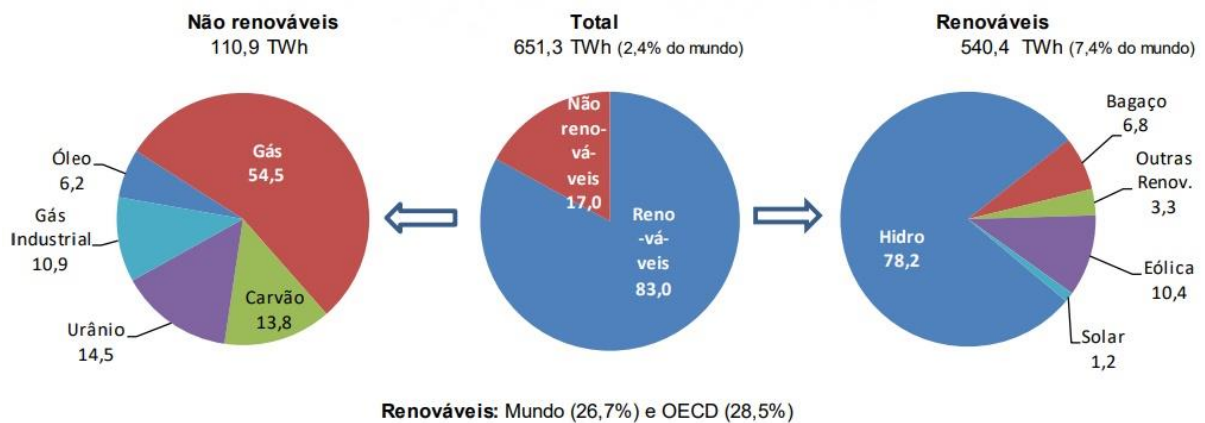
2.2.1 Hidroeletricidade

A energia hídrica é aquela que utiliza a força cinética das águas e a converte em energia elétrica, tal como a Usina Hidrelétrica de Itaipu localizada no Rio Paraná entre o Brasil e o Paraguai (CALIJURI, 2013). A Itaipu é hoje a segunda maior usina hidrelétrica geradora de energia elétrica do mundo.

Chen (2009) relata que o princípio básico de uma usina hidrelétrica é usar a força de uma queda d'água para gerar energia elétrica. Essas usinas possuem enormes turbinas que giram impulsionadas pela pressão da água de um rio, em geral represado. Ao girar, as turbinas acionam geradores que produzem energia elétrica. No Brasil, as hidrelétricas são as principais

responsáveis pela geração de energia que usamos. A Figura 2 ilustra o gráfico da oferta de energia elétrica do Brasil em 2019, considerando apenas as fontes para geração elétrica.

Figura 2 - Oferta Interna de Energia elétrica no Brasil – 2019 (%)



Fonte: Ministério de minas e energia. (2019).

Uma usina hidrelétrica de grande porte requer um alto investimento e projeta um grande impacto ambiental ao longo de sua implementação. Por outro lado, após sua construção, é uma fonte de energia limpa e renovável (YUKSEL, 2010).

2.2.2 Energia das marés

É a utilização da força das ondas e das marés na produção de energia, esse tipo de geração de energia é conhecido como usina marem-otriz (NASCIMENTO, 2017). Existem várias maneiras de aproveitamento das ondas e correntezas do oceano. Alguns países, como por exemplo a França, já implementam este tipo de geração de energia há alguns anos

Conforme Nascimento (2017), para aproveitar a energia das marés, constrói-se uma barragem local conveniente (preferencialmente em regiões com grande variação do nível do mar), instalando comportas e turbinas de forma apropriada. Quando a maré está subindo, abrem-se as comportas. A água é represada com o fechamento das comportas, quando a maré estiver

no ponto mais alto. Após o recuo da maré até um determinado nível, solta-se a água represada através das turbinas, gerando energia elétrica.

A primeira usina maremotriz do mundo foi construída em La Rance, na França, em 1966. Hoje, essa forma de geração de energia é utilizada principalmente no Japão, na Inglaterra e no Havaí - mas há usinas maremotrizes em construção ou em fase de planejamento no Canadá, no México, no Reino Unido, nos EUA, na Argentina, na Austrália, na Índia, na Coreia e na Rússia.

2.2.3 Energia eólica

A energia eólica é a energia gerada a partir do vento (CALIJURI, 2013). Essa energia tem sido aproveitada desde a antiguidade para mover barcos impulsionados por velas ou mesmo para fazer funcionar a engrenagem de moinhos. Nos moinhos de vento a energia eólica é transformada em energia mecânica, utilizada na moagem de grãos ou para bombear água. Para a geração de energia elétrica são construídas gigantescas turbinas eólicas que, acopladas a um eixo, acionam um gerador que transforma energia mecânica em energia elétrica (CALIJURI, 2013).

No Brasil apesar de existir um território vasto com ótimo potencial de geração de energia elétrica utilizando o vento, ainda é produzida pouca energia a partir desta fonte. Uma restrição presente no aproveitamento dessa energia é que para implementar uma usina eólica precisa-se de um amplo território, já que as torres e as turbinas exigem grande distância umas das outras, ocupando áreas extensas. Todavia, seu impacto ambiental é mínimo, tanto em termos de ruído quanto no ecossistema (ANEEL, 2002).

2.2.4 Biomassa

Segundo a ANEEL (2002), a biomassa pode ser utilizada como fonte de energia, seja ela de origem animal ou vegetal. A biomassa é formada indiretamente pela energia solar, quando a energia solar é absorvida pelas plantas através da fotossíntese e convertida em energia química, servindo assim como base para todos os seres vivos.

A biomassa é utilizada na produção de energia a partir de processos como a combustão do material orgânico produzida e acumulada em um ecossistema. A queima de biomassa provoca a liberação de dióxido de carbono na atmosfera, mas como este composto havia sido previamente absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, o balanço de emissões de CO₂ é nulo. Alguns dos elementos mais utilizados para a produção de energia através desse processo são: cana-de-açúcar, serragem, galhos e folhas secas, palha e cascas residuais da produção agrícola (CALIJURI, 2013).

2.2.5 Hidrogênio

O hidrogênio pode ser utilizado como combustível gasoso e pode ser produzido por processos eletroquímicos, a partir principalmente da eletrólise da água. Muitos cientistas sugerem o uso do gás hidrogênio para substituir o petróleo e o gás natural. Esse gás não está disponível em grande quantidade na natureza, mas pode ser produzido por processos químicos. No futuro, o hidrogênio poderá ser obtido pela decomposição da água doce ou salgada (KANDINYA, 2019).

Segundo Calijuri (2013), o gás hidrogênio pode ser queimado em uma reação com o oxigênio em usinas térmicas, ou em uma célula combustível que converte a energia química em corrente elétrica. O autor ainda relata que o grande problema para o emprego desse elemento é a dificuldade de armazenamento, devido a sua alta inflamabilidade. Além disso, pela Segunda Lei da Termodinâmica, a energia obtida pela queima de H₂ é sempre menor que a energia gasta para sua produção.

Portanto, essa fonte só será viável à medida que for possível produzir H₂ em grande escala. Outro problema é o gasto energético necessário para se produzir H₂. Várias pesquisas buscam desenvolver sistemas mais seguros de utilização de hidrogênio. Quanto à poluição do ar, o impacto depende do combustível a ser empregado para a produção de H₂. Os cientistas hoje tentam desenvolver células que capturem diretamente a luz solar para produzir H₂ (CALIJURI, 2013).

2.2.6 Energia solar

Segundo Lopes (2012), o sol é considerado como o responsável pela manutenção da vida no planeta terra, relacionando-se direta ou indiretamente na origem de todas as formas de energia conhecidas. De acordo com Requena (2019) em comparação com todas as outras fontes de energia, podemos dizer que o sol é uma fonte inesgotável de energia.

Toda a energia que chega no planeta terra a partir do sol em apenas um dia é equivalente a energia consumida no mundo por 27 anos (LOPEZ, 2012). Em apenas uma hora o sol fornece para a terra uma quantidade de energia superior ao consumo global de energia elétrica de um ano inteiro. O sol é uma fonte de energia gratuita, renovável e não poluente (CRESESB, 2014).

Em geral, a energia solar tem sido usada de duas maneiras diferentes: para eletricidade e para aquecimento. A energia térmica solar é usada para aquecer água ou ar em aplicações como aquecimento e resfriamento para residências e empresas e também pode ser usada para geração de energia, como uma usina solar fotovoltaica (CALIJURI, 2013).

2.2.7 Microgeração de energia

Microgeração é um termo normalmente usado para descrever um gerador que aproveita energia de fontes renováveis para fornecer energia a uma residência, empresa ou outro usuário de eletricidade local. Dependendo da localização do usuário e das leis governamentais nessa área, sistemas de diferentes tamanhos podem ou não se enquadrar na classificação de um microgerador (CARRINGTON, 2017).

Os microgeradores são "conectados à rede" ou "desligados da rede". Os microgeradores fora da rede usam baterias para acumular e reservar a eletricidade gerada. Os microgeradores conectados à rede não têm outros dispositivos de armazenamento e usam a rede elétrica para acomodar essa diferença (CHANDEL, 2015).

Os diferentes sistemas de microgeração normalmente usados incluem painéis solares, microturbinas eólicas, sistemas combinados de calor e energia e hidropilhas em microescala. A eletricidade gerada por esses sistemas é normalmente corrente contínua e deve ser convertida

em corrente alternada antes do uso dentro de uma casa ou exportada para a rede elétrica. Isso é feito usando um dispositivo chamado inversor (MEAH, 2008).

2.2.8 Vantagens e desvantagens das energias renováveis

É fato que as energias renováveis são um marco histórico da humanidade. No entanto, apesar das suas grandes vantagens, existem algumas desvantagens na sua utilização (KANDINYA, 2019). As principais vantagens são:

- a) Podem ser consideradas inesgotáveis à escala humana comparando aos combustíveis fósseis;
- b) O seu impacto ambiental é menor;
- c) Permitem a criação de novos postos de emprego (investimentos em zonas desfavorecidas);
- d) Permitem reduzir as emissões de gás carbônico, melhorando a qualidade de vida;
- e) Conferem autonomia energética a um país, uma vez que a sua utilização não depende da importação de combustíveis fósseis;
- f) Conduzem à investigação de novas tecnologias que permitam melhorar a eficiência energética.

Algumas desvantagens são:

- a) Custos elevados de investimento e infraestruturas apropriadas;
- b) Impactos visuais negativos no meio ambiente;
- c) Energia da Biomassa – o método de combustão da biomassa não é limpo;
- d) Energia Hidroelétrica – causa erosão de solos que pode ter impacto na vegetação do local;
- e) Energia Solar – os custos iniciais são muito elevados e a geração depende de condição específica de tempo;
- f) Energia Eólica – o custo inicial das turbinas é muito elevado, e também a existência de muito barulho produzido.

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O aproveitamento de energia solar, tanto como fonte de calor quanto de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. Especialistas afirmam que o aproveitamento da energia solar como fonte geradora de energia elétrica será a energia do futuro, pois o sol é uma fonte de energia inesgotável (LOPEZ, 2012).

A energia solar é importante na preservação do meio ambiente, pois tem muitas vantagens sobre as outras formas de obtenção de energia, como por exemplo: não ser poluente, não influir no efeito estufa, não precisar de turbinas ou geradores para a produção de energia elétrica. Apesar das vantagens citadas, a desvantagem corresponde a exigência de altos investimentos para o seu aproveitamento tal como a área para captação de raios solares pelas placas fotovoltaicas (CRESESB, 2014).

A energia fotovoltaica é fornecida de painéis contendo células fotossensíveis ou que sob a incidência do sol geram energia elétrica. A energia gerada pelos painéis pode ser armazenada em bancos de bateria, para que seja usada em período de baixa irradiação ou durante a noite (CARRINGTON, 2017).

A conversão direta de energia solar em energia elétrica é realizada nas células solares através do efeito fotovoltaico, que consiste na geração de uma diferença de potencial elétrico através da radiação. Esse efeito ocorre quando fótons, incidem sobre átomos de silício, provocando a emissão de elétrons, gerando corrente elétrica. Este processo não depende da quantidade de calor, pelo contrário, o rendimento da célula solar cai quando sua temperatura aumenta (LOPEZ, 2012).

2.3.1 Energia solar fotovoltaica no Brasil

O Brasil é o país mais avançado da América do Sul no que diz respeito ao desenvolvimento de energias renováveis. Foi o primeiro país do terceiro mundo a fabricar comercialmente células fotovoltaicas a partir do silício monocristalino. Em 1979 surgiu no estado de São Paulo a primeira fábrica de módulos fotovoltaicos em Vargem Grande paulista como consequência à crise do petróleo, iniciada em 1973. No Brasil, o potencial de energia

fotovoltaica é imenso, dados seus altos índices de irradiação solar. Atualmente, os governos e as concessionárias de serviços públicos são os principais investidores (TOLMASQUIM, 2014).

O projeto federal Luz Para Todos, que visa levar energia elétrica para comunidades isoladas e carentes, como a região nordeste do país também faz amplo uso da energia fotovoltaica. No entanto, os sistemas fotovoltaicos são uma grande novidade. Os principais obstáculos têm sido o custo de compra e instalação dos painéis e de uma política oficial de subsídios. Mas a crise que gerou o apagão em várias regiões do país em 2001, foi um dos sinais da necessidade de buscar novas fontes de fornecimento.

O laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Labsolar/UFSC), que há alguns anos pesquisa e aplica essa tecnologia, vem desenvolvendo os projetos Estádios Solares e Aeroportos Solares que são uma ótima vitrine para demonstrar a tecnologia fotovoltaica (RUTHER, R 2019).

Um levantamento realizado pelo Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos da Universidade de São Paulo (USP) aponta que existem 38 usinas solares conectadas à rede instaladas em universidades, institutos de pesquisas e concessionárias de energia (KOTO, 2009).

No Brasil, segundo o ministério de minas e energia, as estimativas de capacidade instaladas de sistemas fotovoltaicos até o final de 2011 era de aproximadamente 31,5 MW instalados no país, sendo 30 MW em sistemas não conectados à rede e 1,5 MW conectados à rede elétrica. Em 2019 a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos chegou a 1.275 MW instalados. A principal explicação é o preço alto da implantação de um sistema fotovoltaico, contudo esse valor vem caindo consideravelmente nos últimos anos. Em 2019, a Oferta Interna de Energia Elétrica teve como destaque a geração solar, que teve aumento de 92,2% (316% em 2018 e 876% em 2017) (MME, 2019).

2.3.2 Legislação em vigor e normas da ABNT

A legislação que rege a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil não previa os sistemas solares fotovoltaico integrado às edificações urbanas e interligadas à

rede elétrica convencional. Isto fez com que a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL revisasse suas normativas.

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL é o órgão público responsável por regular o mercado de energia elétrica no Brasil. A resolução 112/ 18 de maio de 1999, estabelece os requisitos necessários à obtenção de registro ou autorização para a implantação ou repotenciação de centrais geradoras de fontes alternativas de energia, incluindo as centrais geradoras fotovoltaicas.

Na área de normatização, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da comissão de Estudos CE-82.1 (Sistema de conversão fotovoltaico de energia solar) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (COBEI) vem se empenhando no sentido de elaborar normas técnicas referentes aos sistemas fotovoltaicos. Outro documento normativo importante na instalação de sistemas solares fotovoltaicos é a norma ABNT NBR 5410, que normatiza as instalações elétricas de baixa tensão. No Brasil a ANEEL aprovou a Resolução Normativa 482/2012 que permite a conexão de um sistema residencial que estimula a geração pela fonte solar.

2.4 FUNCIONAMENTO E COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

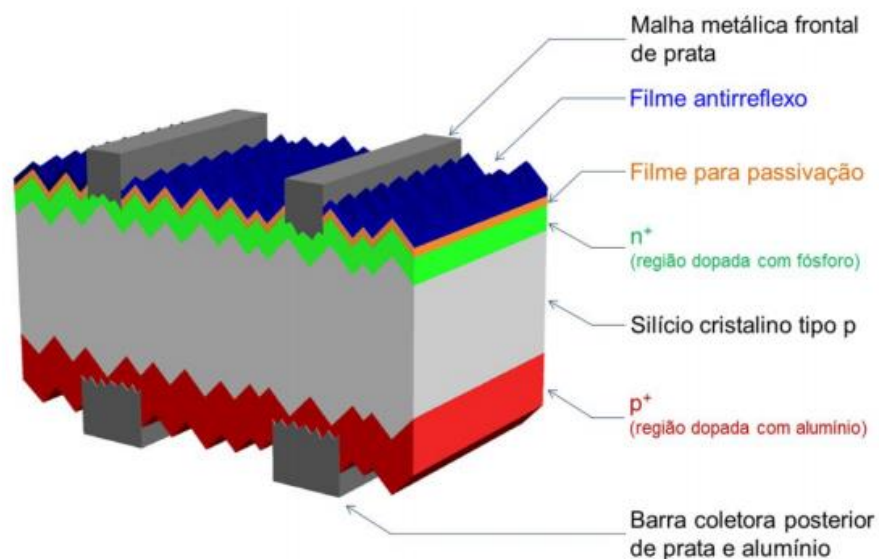
Um sistema fotovoltaico é composto por um ou mais módulos fotovoltaicos e por um conjunto de equipamentos complementares, como baterias e inversores, geradores e acumuladores de energia. As células mais usadas são as de silício, material semicondutor. A célula de silício cristalino é a mais utilizada na conversão de energia solar em eletricidade porque a sua tecnologia para fabricação é bastante conhecida. Ao incidir a luz solar sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com elétrons da estrutura do silício fornecendo energia e o transformando em condutor, devido ao campo elétrico gerado (BRAGA, 2018).

O princípio de funcionamento envolvido na geração de energia de uma célula fotovoltaica é o efeito fotovoltaico que ocorre com o surgimento de uma corrente elétrica em um material semicondutor quando exposto à luz visível, mas sem que haja armazenamento desta corrente nas células. Os semicondutores se caracterizam pela presença de bandas intermediárias de condução de energia onde é permitida a entrada de elétrons, chamada banda de valência, e de outra banda totalmente vazia, a banda de condução. Para entender melhor esse fenômeno

precisamos conhecer os materiais empregados na fabricação das células fotovoltaicas e o seu modelo atômico (CRESESB, 2014).

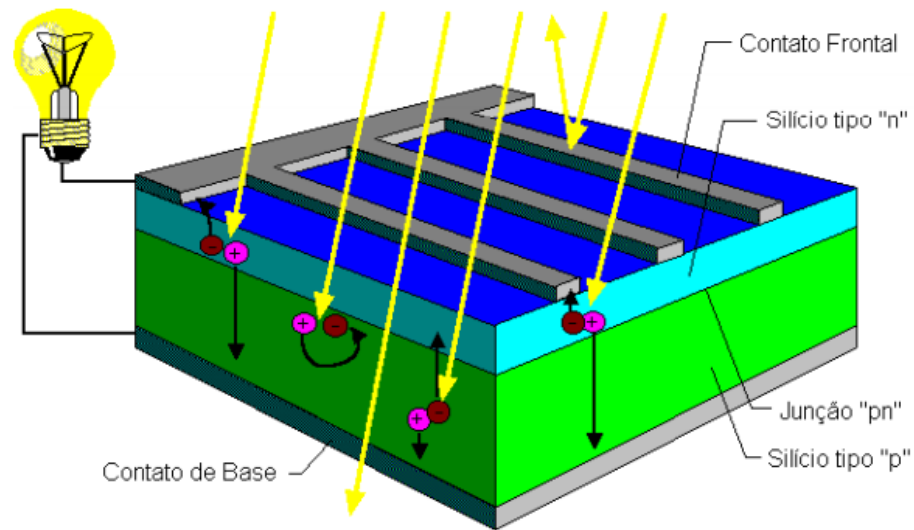
O silício é o semicondutor mais utilizado na fabricação das células fotovoltaicas. Os átomos do silício se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos átomos vizinhos, formando uma rede cristalina. Se forem adicionados átomos com cinco elétrons de ligação, como por exemplo os de fosforo, um elétron ficará sobrando e a ligação atômica será fraca ao seu átomo de origem. Com a adição de energia térmica este elétron se livra de seu átomo de origem, indo para a banda de condução. Assim, o fosforo é chamado de dopante doador de elétrons e denominado dopante n ou impureza n. A Figura 3 ilustra a estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino (LOPES, 2012). O efeito ocorre quando fótons, incidem sobre os átomos de silício, provocando a emissão de elétrons, gerando corrente elétrica. A Figura 4 mostra o corte transversal de uma célula de silício sobre a incidência de raios solares.

Figura 3 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014

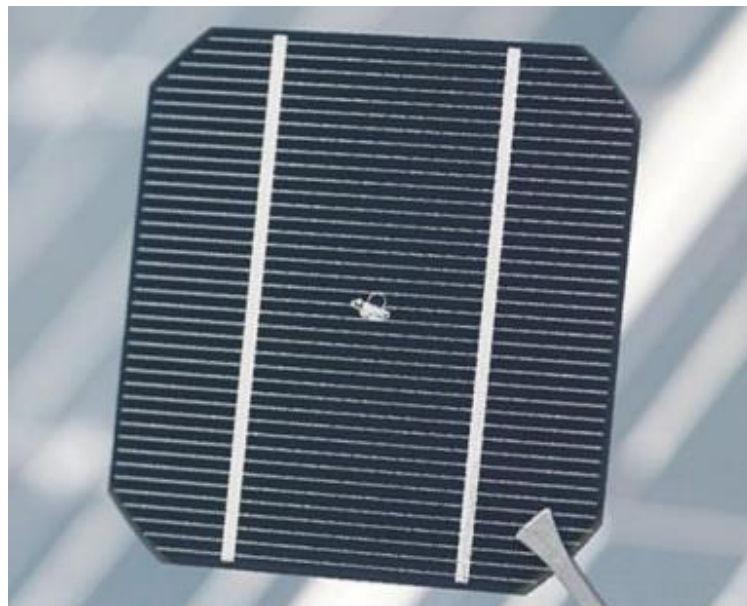
Figura 4 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de LOPEZ (2012)

Uma única célula fotovoltaica tem a capacidade de produção de energia elétrica de cerca de 1 a 2 W, que corresponde a uma tensão de 0,5 V e corrente entre 2 a 4 A. Assim, para se atingir um determinado nível de corrente e tensão, é necessário a associação de várias células, por meio de ligações em série e em paralelo, formando assim um módulo voltaico (LOPEZ, 2012). A Figura 5 ilustra uma fotografia de uma célula de silício.

Figura 5 - Célula fotovoltaica de silício cristalino



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014

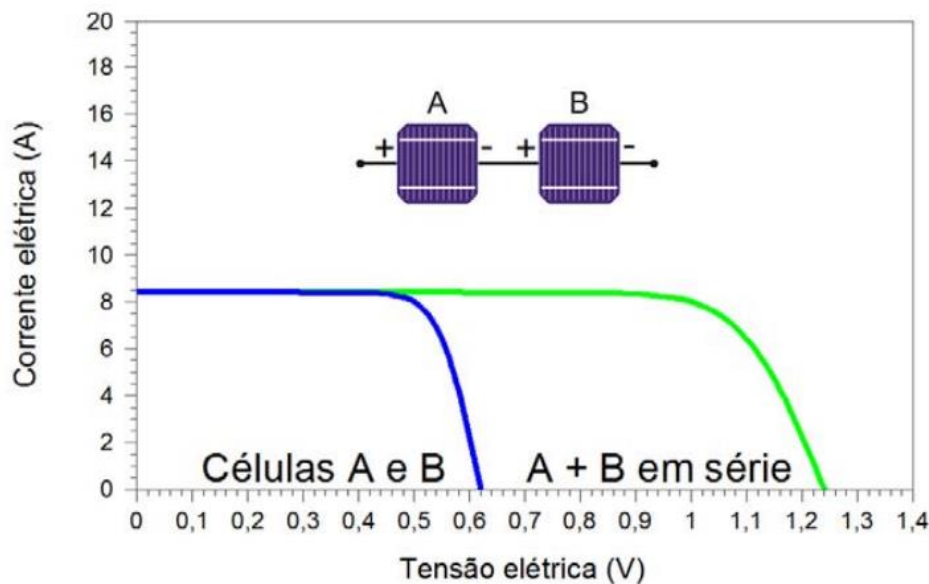
A eficiência de uma célula fotovoltaica (η) é calculada pela potência elétrica obtida na saída (P_0), dividida pela potência fornecida pela fonte de luz (P_1), expressa pela equação:

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \times 100\% \quad (1)$$

Como exemplo, em uma célula que possui 4% de eficiência converte 4% da energia luminosa incidente sobre sua superfície em energia elétrica.

A conexão mais usual de células fotovoltaicas é o arranjo em série. Neste tipo de conexão a tensão resultante será o somatório das tensões de cada célula presente na associação, enquanto a corrente resultante permanece a mesma de uma célula sozinha. A Figura 6 ilustra a curva característica IxV (curva de potência) de duas células conectadas em série.

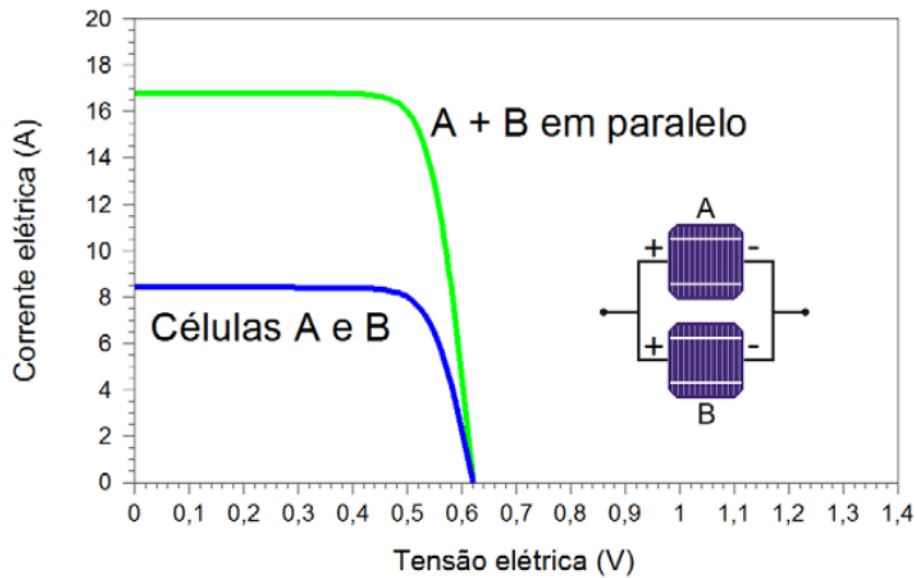
Figura 6 – Curva característica de células conectadas em série



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014

Nas células conectadas em paralelo, a corrente resultante será o somatório das correntes de cada célula presente na associação. A tensão resultante será a mesma de uma célula sozinha. A Figura 7 ilustra a curva característica IxV (curva de potência) de duas células conectadas em paralelo.

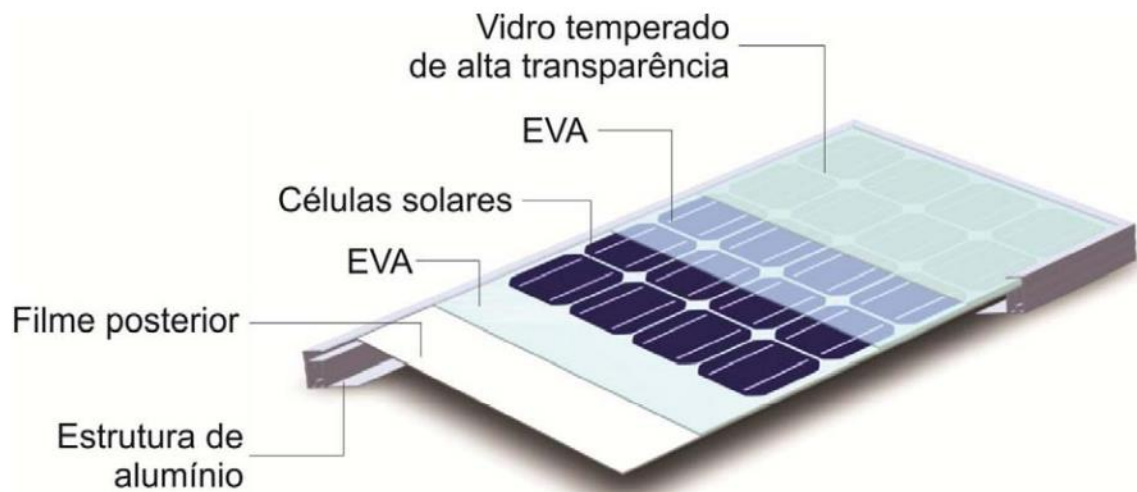
Figura 7 - Curva Característica IxV de células conectadas em paralelo



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014

A união de várias células fotovoltaicas forma um módulo fotovoltaico. A quantidade de células que compõem um módulo fotovoltaico é determinada pela tensão e corrente necessárias na saída do módulo. Na maioria das vezes um módulo é composto de 33 a 36 células ligadas em série, fornecendo uma tensão de aproximadamente 18 V.

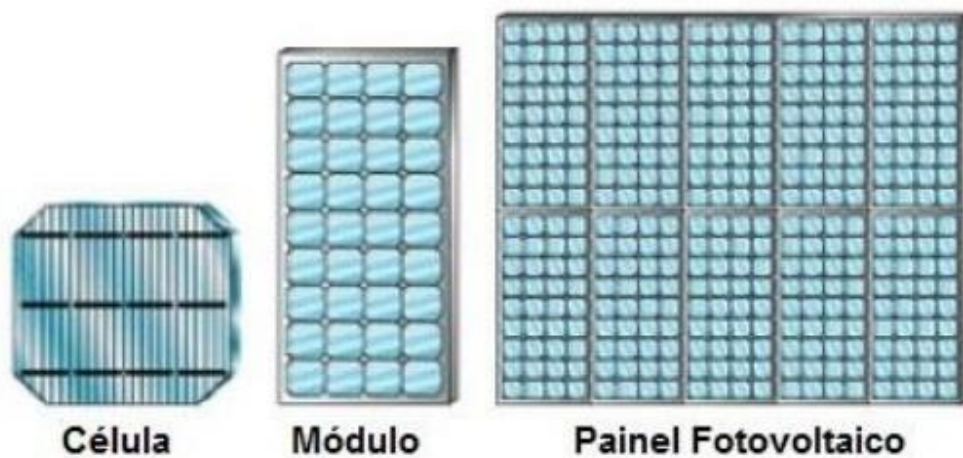
Figura 8 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014.

O painel solar é formado de um conjunto de módulos fotovoltaicas interligados e posicionados em uma estrutura de sustentação. A Figura 9 ilustra a célula fotovoltaica, o agrupamento de células formando um módulo fotovoltaico, e a união dos módulos formando um painel fotovoltaico.

Figura 9 - Célula, módulo e painel fotovoltaico



Fonte: Adaptado de UNESCO (2011)

Podemos calcular a potência gerada de um módulo solar com a ajuda da equação 2, onde P_g é a potência gerada por um painel solar, η é o rendimento do sistema, A é a área do painel fotovoltaico e R_S é a radiação solar incidente em função do tempo t .

$$P_g = \eta \cdot A \cdot R_S(t) \quad (2)$$

Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CRESESB,2014), a identificação de um módulo fotovoltaico geralmente é feita pela sua potência, considerando a irradiância solar de 1.000 W/m^2 e temperaturas de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Quando o módulo recebe luz solar, pode-se medir uma tensão e uma corrente entre seus terminais positivos e negativos utilizando um multímetro.

Os módulos podem ser conectados em série e/ou paralelo, dependendo da corrente e tensão desejadas, para formar painéis fotovoltaicos com maiores potências. A escolha das associações deve ser baseada em quais correntes e tensões se desejam obter na saída dos terminais negativo e positivo do painel fotovoltaico. De maneira análoga à conexão das células fotovoltaicas, as ligações dos módulos e painéis solares seguem o mesmo princípio, expresso nas equações a seguir, onde V é a voltagem dos módulos e I a amperagem:

Módulos em série:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (3)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (4)$$

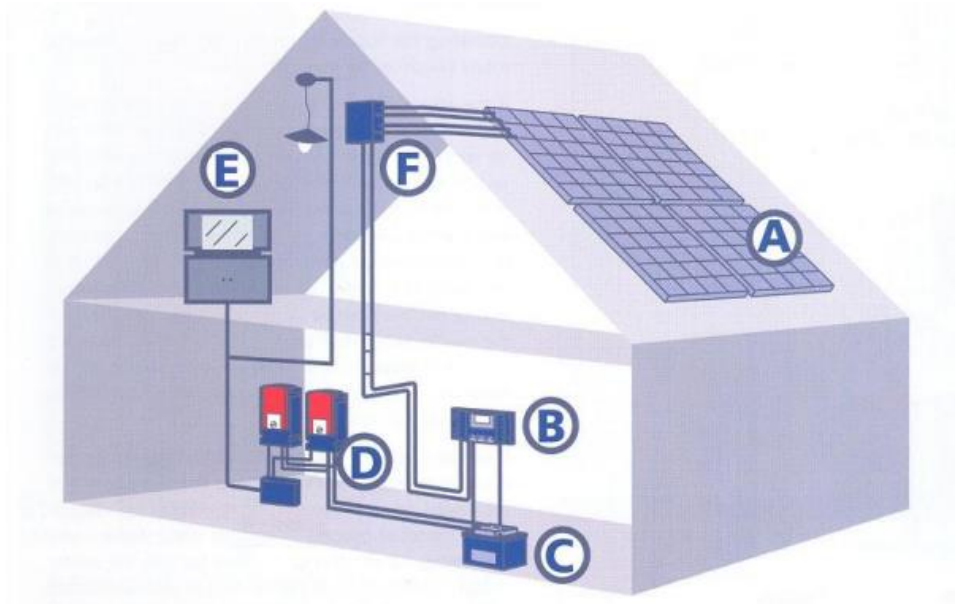
Módulos em paralelo:

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

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (6)$$

Os sistemas fotovoltaicos são classificados de acordo com a aplicação de sua energia gerada, divididos em isolados, conectados à rede e os sistemas híbridos. Os sistemas isolados são autônomos, assim não possuem conexão com rede elétrica convencional. De forma geral, são compostos por painéis solares, regulador de carga, baterias e inversores como está ilustrado na Figura 10. Os sistemas isolados são utilizados como alternativa para serem implantados em locais de difícil acesso onde geralmente não ocorre o fornecimento de energia elétrica através da rede de energia convencional. Dependendo da finalidade e dos aparelhos que serão ligados ao sistema, o sistema pode conter ou não um sistema de armazenar energia, como ilustra a Figura 11.

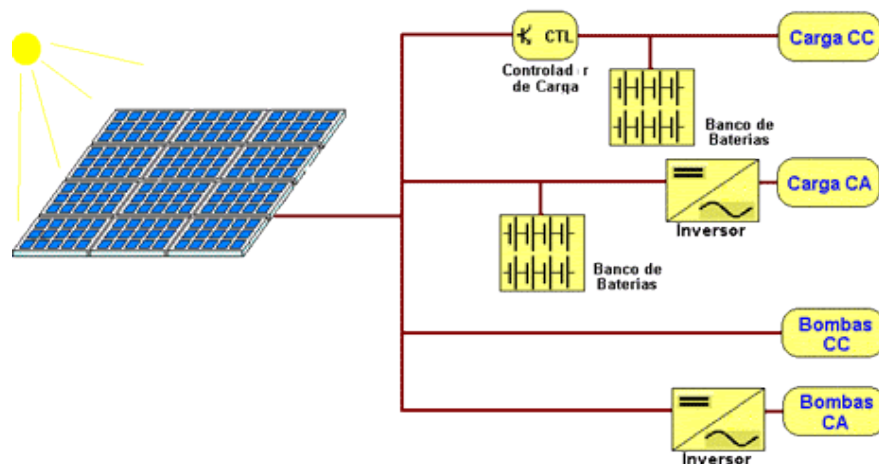
Figura 10 - Representação de um sistema fotovoltaico isolado



Fonte: Adaptado de Neosolar (2021, www.neosolar.com.br)

A Figura 10 mostra os componentes básicos de um sistema fotovoltaico isolado, sendo: A - painel fotovoltaico; B – controlador de carga; C – banco de baterias; D – inversores; E – equipamentos elétricos c.a. alimentados; F – caixa de conexão.

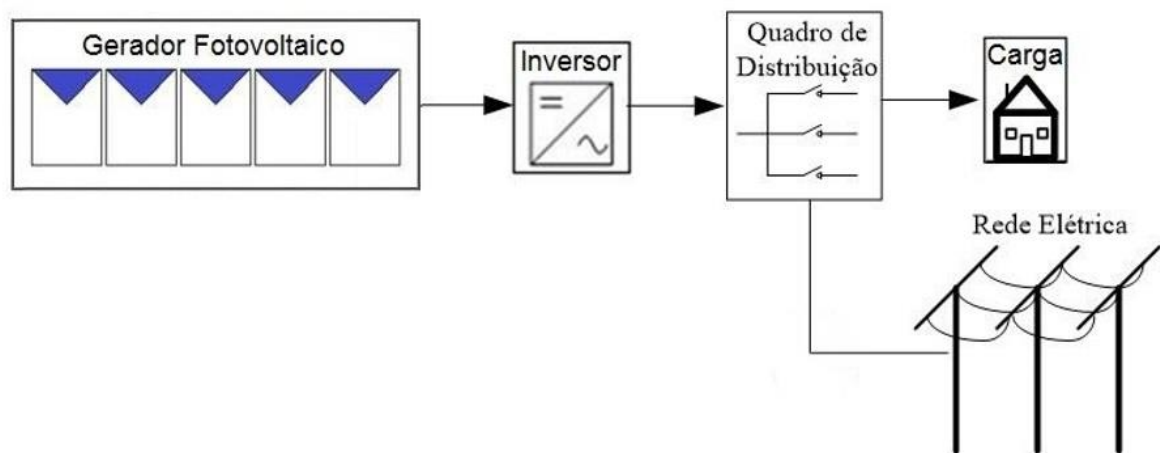
Figura 11 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada



Fonte: Adaptado de LOPEZ (2012)

Nos sistemas conectados à rede o painel solar fornece energia em conjunto com a rede distribuidora de energia convencional, não necessitando de baterias para o seu armazenamento. A energia excedente gerada pelo painel solar é entregue à rede elétrica, de maneira que o medidor de energia gira ao contrário, resultando na redução da conta de energia elétrica. Quanto o consumo de energia é maior que a energia gerada pelo painel, a rede elétrica dá suporte a essa diferença. A Figura 12 ilustra o diagrama de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica convencional.

Figura 12 - Diagrama de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos 2014.

Os sistemas híbridos são sistemas mais complexos que fazem a integração da energia solar fotovoltaica a outros sistemas de geração, como a geração eólica ou geradores a diesel. Assim, não dependem de apenas uma fonte de geração, e podem ser integrados à rede elétrica ou isolados (LOPEZ, 2012).

2.5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento de energia elétrica é uma alternativa eficaz em sistemas isolados de geração de energia elétrica. O processo refere-se a um modo de conversão de energia elétrica em uma forma que pode ser armazenada por um tempo para posteriormente ser convertida de volta para energia elétrica quando necessário. Este processo permite que a eletricidade seja armazenada em momentos de baixa demanda, baixo custo de geração ou de fontes de energia intermitentes para ser usada em épocas ou momentos de alta demanda, alto custo de geração ou quando nenhum outro meio de geração estiver disponível (CHEN, 2009).

As principais formas de armazenamento de energia, presentes na literatura, são: Volantes de inércia, energia térmica, ar comprimido, capacitores e hidroacumulação. Estas formas de armazenamento serão apresentadas nesta seção.

2.5.1 Volantes de inércia

O volante de inércia é uma estrutura rotativa que armazena energia cinética. O armazenamento depende da quantidade de rotações da estrutura em torno do eixo inercial. Quanto maior a velocidade de rotação e mais afastada a massa estiver do centro de rotação, mais energia será armazenada (PEREIRA, 2013).

O mecanismo tem a capacidade de armazenar energia durante muito tempo. No processo de carga, o volante é girado por um motor que durante a descarga, atua como um gerador de produção de eletricidade a partir da rotação do volante. O tamanho e a velocidade do rotor, bem como a potência nominal, dependem do motor-gerador e vão determinar a energia total de um sistema de volante (CHEN, 2008).

Na comparação com as baterias, a vantagem do sistema de volante se dá em função da longa vida útil, sendo capaz de fornecer centenas de milhares de ciclos completos de carga e descarga, mantendo uma potência específica e altamente eficiente.

2.5.2 Armazenamento de energia térmica

Consiste no armazenamento do calor ou frio para posteriormente ser usado em aplicações de aquecimento e resfriamento ou convertidos em energia elétrica. São comumente utilizados em processos de refrigeração e aquecimento de ambientes e processos industriais. Os elementos utilizados nesse sistema são classificados em de baixa ou de alta temperatura, podendo ser mantidos nessas condições de forma isolada, por isso são considerados materiais de amplo espectro (CHEN, 2008).

A eficiência geral desses sistemas é considerada baixa, em torno de 30 a 60%. Contudo, são sistemas considerados benéficos ao meio ambiente. Segundo Chen (2008), os dois processos físicos por trás dessas tecnologias são a troca de calor sensível e a troca de calor latente, conforme será apresentado.

Nos acumuladores de calor sensível, o fenômeno físico é necessariamente a mudança de temperatura de uma massa sem que haja mudança de sua fase. Este acumulador é largamente utilizado para aquecimento de água em domicílios. No processo a água aquecida é mantida em um compartimento isolado termicamente, até que ela seja utilizada para consumo.

Os acumuladores de calor latente fazem a acumulação térmica baseada na transição entre as fases sólida e líquida de um material e funcionam em temperatura constante. No acúmulo de energia, ocorre a mudança do estado sólido para o líquido, durante a descarga o material volta ao estado sólido trocando calor com um fluido de trabalho.

2.5.3 Acumuladores de ar comprimido

O armazenamento de ar comprimido é a única tecnologia disponível comercialmente, além da hidroacumulação, capaz de armazenar quantidades de energia acima de 100 MWh, podendo reservar a energia por longos períodos de tempo sem perdas significativas de eficiência (MEAH, 2016; DENHOLM et al., 2010).

O armazenamento é realizado através da compressão e estocagem de ar em um reservatório. Após a compressão o gás é resfriado para que se possa ter o controle da pressão e temperatura do reservatório. O aproveitamento energético é feito durante a descarga, aquecendo

o ar e misturando ao combustível para ser levado a câmara de combustão da turbina, que é responsável pela geração de energia elétrica (PEREIRA, 2013).

Os sistemas de armazenamento de energia de ar comprimido são projetados para circular diariamente e para operar de forma eficiente durante condições de carga parcial. Esse sistema é constituído por cinco componentes, dentre eles: um gerador que oferece suporte de engate para os trens do compressor ou da turbina; um compressor de ar que pode apresentar dois ou mais estágios e pós resfriadores que conferem uma compressão mais econômica e são atuantes na redução do teor de umidade do ar comprimido. Na sequência, o trem de turbina, havendo duas turbinas (de alta e baixa pressão); uma cavidade (cavernas de rochas, de sal, reservatórios porosos, por exemplo), para armazenar o ar comprimido. E por fim, controles de equipamentos e auxiliares, tais como as unidades de armazenamento de combustível e trocadores de calor (AHEARNE, 2004).

Segundo Chen (2009), basicamente seu funcionamento consiste na turbina a gás convencional. Ocorre em dois processos separados, na qual a energia é armazenada na forma potencial elástica e energia do ar comprimido. Esse evento só é possível pois há o desacoplamento da compressão e da expansão dos ciclos de uma turbina a gás convencional. Dessa forma quando há baixa demanda, a energia é armazenada por compressão de ar em um espaço hermético, normalmente 4,0–8,0 MPa. Para fazer a extração dessa energia, o ar comprimido precisa ser retirado desse armazenamento, procedendo o seu aquecimento e posteriormente, a sua expansão através de uma turbina de alta pressão, que captura alguma energia do ar comprimido.

2.5.4 Baterias

Uma das formas mais antigas de se armazenar eletricidade na forma de energia química é a bateria recarregável. É composta por uma ou mais células eletroquímicas, onde cada célula consiste em um líquido, pasta, ou eletrólito sólido junto com um eletrodo positivo (ânodo) e um eletrodo negativo (cátodo) (CHEN, 2009).

Segundo o mesmo autor, em ambos os eletrodos as reações ocorridas permitem que haja um fluxo de elétrons que compõem um circuito. Tais reações podem ser revertidas,

possibilitando que a bateria possa ser recarregada pela aplicação de uma tensão externa através dos eletrodos. Geralmente podem ter uma alta eficiência energética (60–95%).

As baterias são sistemas eletroquímicos de acúmulo de energia com a capacidade de carga, acumulação e descarga. São utilizadas para o armazenamento de energia elétrica de corrente contínua na forma química para uso posterior. As reações químicas em uma bateria são reversíveis, permitindo que a bateria possa ser recarregada pela aplicação de uma tensão externa através dos eletrodos (MEAH, 2008).

Podem ser classificadas como recarregáveis e não recarregáveis. As baterias não recarregáveis podem fornecer energia apenas uma vez e são empregadas em sistemas de baixo consumo, enquanto as baterias recarregáveis, também chamadas de acumuladores de energia, são utilizadas em sistemas de potência mais elevada e acumulam energia por longos períodos, como é o caso de sistemas fotovoltaicos, onde a energia acumulada pelas baterias é utilizada a noite e em períodos nublados (CRESESB, 2014).

Segundo Lopez (2012), devido a uma série de restrições inerentes ao armazenamento de energia que as baterias apresentam, como baixas densidades de energia, baixa capacidade de energia, alto custo de manutenção, um ciclo de vida curto e uma descarga limitada, além da maioria conter materiais tóxicos em sua composição, a utilização desse método em grande escala tem sido bem rara. Enfatizando a questão tóxica atrelada a alguns materiais e também ao fato de as baterias não possuírem uma longa vida útil, é imprescindível se atentar ao impacto ecológico que o incorreto e frequente descarte pode trazer ao meio ambiente. Tornam-se necessários a pesquisa e o desenvolvimento de diferentes formas de armazenamento de energia, que sejam mais duradouras e gerem menos impacto ambiental. A utilização de sistemas hidráulicos é uma forma de armazenar energia que pode ter longa vida útil e não é composta por elementos químicos que precisam de cuidados especiais para o descarte (CHEN, 2009).

2.5.5 Capacitores

A utilização de capacitores é a forma mais direta de se armazenar energia elétrica. Sua composição é feita por duas placas de metal separadas por uma camada não condutora chamada dielétrico. Dessa forma, uma placa ao ser carregada com eletricidade de uma fonte de corrente

contínua irá apresentar uma carga de sinal positivo enquanto a outra placa, sinal negativo (CHEN, 2009).

Os capacitadores desempenham vantagem sobre as baterias convencionais, já que conseguem efetuar o carregamento de forma mais rápida e com alta eficiência. Apesar dos capacitores convencionais terem sido desenvolvidos para suprir a demanda nas horas de pico durante o horário de verão, como principal desvantagem, possuem uma baixa densidade de energia. Tanto os sistemas de volante quanto capacitores, estão voltados à qualidade energética, de modo a serem aplicados para a recuperação de energia em sistemas de trânsito de massa (IBRAHIM, 2008).

Como forma de minimizar esse problema, o progresso resultou em supercapacitores, que armazenam energia por meio de uma solução de eletrólito entre dois condutores sólidos, em vez do arranjo mais comum de um sólido dielétrico entre os eletrodos (IBRAHIM, 2008).

Possuindo o mesmo princípio de funcionamento dos capacitores, os supercapacitores podem ser carregados mais rápido que as baterias convencionais e utilizados por dezenas ou milhares de vezes com alta eficiência. Diferente de como ocorre nas baterias, nos capacitores os fenômenos de acumulação não dependem de reações químicas e sim do acúmulo de cargas estáticas nos eletrodos. Por conta disso possuem uma alta velocidade de recarga e uma alta potência de descarga de energia (CHEAN, 2009).

Os supercapacitores eletroquímicos possuem capacitância e densidade de energia muito maiores que os capacitores convencionais. Eles armazenam energia por meio de uma solução de eletrólito entre dois condutores sólidos, em vez do arranjo mais comum de um sólido dielétrico entre os eletrodos. Os eletrodos são frequentemente feitos de carbono poroso ou outro material de área superficial alta. Como a área superficial do carbono é muito alta e como a distância entre as placas é pequena é possível que uma grande quantidade de energia seja armazenada (IBRAHIM, 2008).

2.5.6 Hidroacumulação

A hidroacumulação consiste na construção de uma barragem ou tanque para armazenamento de água, sendo utilizada em momento oportuno na geração de energia através de uma turbina hidráulica. O conceito é similar ao da hidroelétrica, entretanto seu

funcionamento não é contínuo e depende de uma fonte adicional de energia para bombear água para o reservatório, já que é construída como forma de acumular energia (CHEAN, 2009).

Segundo Canales (2015), a energia armazenada pela água na forma de energia potencial gravitacional pode ser transformada em energia cinética, que ocorre devido ao movimento da água quando ela é liberada de um reservatório que possibilite escoamento de uma coluna de água. A energia cinética da água quando movimenta uma turbina hidráulica é então convertida em eletricidade.

A energia potencial de um sistema de armazenamento hidrelétrico pode ser obtida através da equação 7, onde o termo E_{pg} é energia potencial acumulada na coluna de água, m a massa de água, g a aceleração da gravidade e h a altura da coluna de água.

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h \quad (7)$$

A potência do sistema (P) relaciona a taxa de variação da energia (dE_{pg}) em relação a variação do tempo (dt) conforme a equação 8:

$$P = \frac{dE_{pg}}{dt} \quad (8)$$

Inserindo a equação 7 na equação 8, se obtém a equação de potência fornecida pela coluna de água em função da variação de massa, a aceleração da gravidade e da diferença de cotas dos reservatórios de água, como expresso na equação 9.

$$P = \frac{d(m \cdot g \cdot h)}{dt} \quad (9)$$

Podemos encontrar a massa através da multiplicação da massa específica (ρ) pelo volume do fluido (V).

$$m = \rho \cdot V \quad (10)$$

A vazão (Q) de um sistema é a derivada de volume em relação ao período de tempo e pode ser obtida pela equação 11.

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

Relacionando as equações 10 e 11 com a equação 9, e considerando que a aceleração da gravidade e a altura da coluna de água são constantes, obtém-se a equação da potência a partir do armazenamento de energia por meio de uma coluna d'água, descrita pela equação 12.

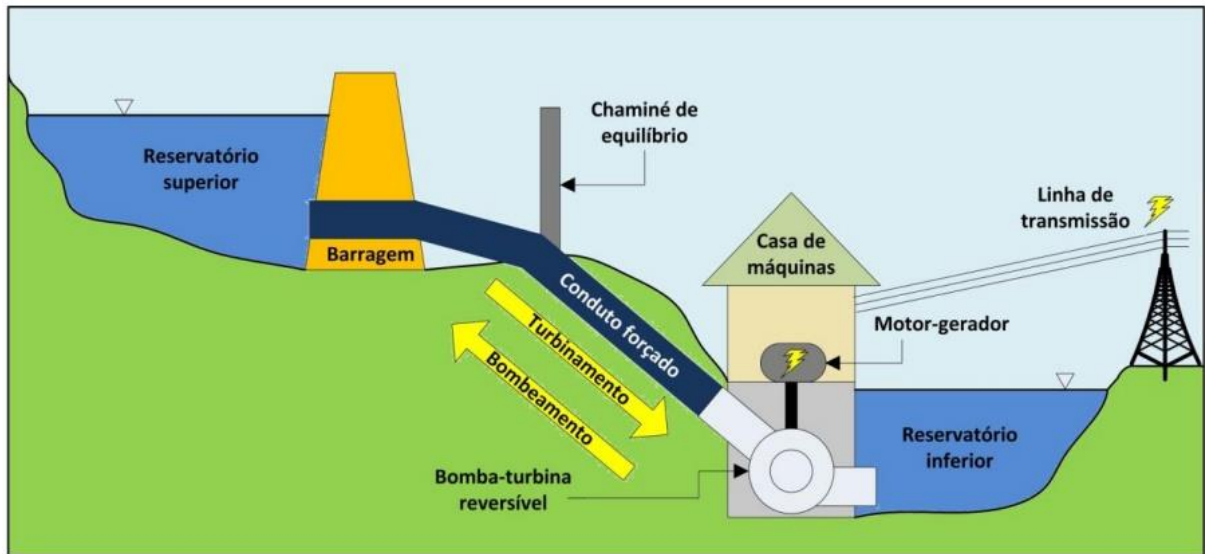
$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \quad (12)$$

Observando a equação 12 e as considerações feitas, pode-se constatar que a potência fornecida por uma coluna de água é proporcional a vazão e a diferença de cotas, e à densidade do fluido.

Nos processos de armazenamento hidrelétrico por bombeamento, o funcionamento depende em geral de dois reservatórios, ambos com elevações que diferem entre si, além de uma unidade responsável por realizar o bombeamento da água, até uma elevada altitude. Assim é feito o armazenamento de energia na forma de energia potencial. fora dos horários de pico. Por fim, uma turbina hidráulica é necessária, para que a conversão de energia potencial em eletricidade ocorra. Contextualizando, quanto maior for a diferença de altura dos reservatórios e o seu volume de água armazenado, maior será a quantidade de energia gerada (CHEN, 2009).

Para aplicação em grande escala a principal tecnologia aplicada no mundo que utiliza este mecanismo é a das usinas hidrelétricas reversíveis (UHER), baseadas no armazenamento de energia gravitacional da água bombeada através de uma diferença de elevação, e nos mesmos princípios de conversão de energia das usinas hidrelétricas convencionais. A Figura 13 apresenta um esquema com os componentes básicos de uma usina hidrelétrica reversível.

Figura 13 - Componentes básicos de uma usina hidrelétrica reversível



Fonte: adaptado de CANALES (2015).

Na década de 1890, Itália e Suíça foram os primeiros países que fizeram o uso dessa tecnologia, cuja primeira aplicação comercial em grande escala ocorreu nos EUA em 1929 (Planta de Rocky River PHS, Hartford) (CHEN, 2009).

Algumas características como vida útil muito longa, ciclo de carga/descarga de confiabilidade e custo mais baixo são vantagens que essa tecnologia apresenta em relação à maioria. Nesse sistema, há uma dependência entre a quantidade de energia e potência acumuladas em relação ao volume d'água e a diferença de elevação (altura) dos reservatórios (CANALES, 2015). As Figuras 14 e 15 ilustram exemplos de usinas hidrelétricas reversíveis.

Figura 14 - Usina hidrelétrica reversível



Fonte: Imagem adaptada de Windpower, (2021)

Figura 15 - Usina hidrelétrica reversível de Elba, na Alemanha



Fonte: Imagem adaptada de Shutterstock, (2020)

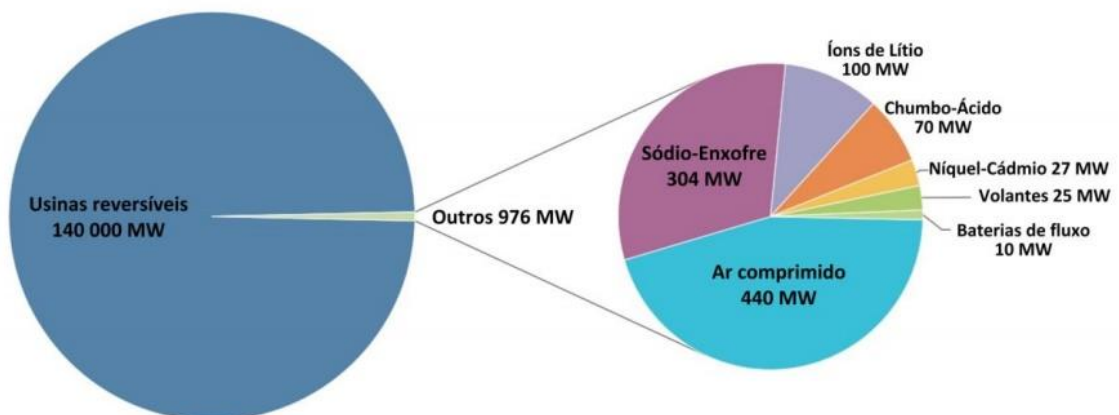
Nesse sentido, as vantagens de se empregar essa tecnologia de armazenamento hidrelétrico vão desde o armazenamento de grandes volumes de água por um longo período de tempo, até a capacidade de ser altamente eficiente. Quanto ao período de armazenamento citado

acima, este irá depender da evaporação e penetração, que nesse sistema, normalmente poderá variar de horas a dias e até por anos. O armazenamento hidrelétrico bombeado é classificado entre cerca de 1000 MW (100 MW – 3000 MW) e instalações continuam sendo construídas a nível mundial a uma taxa anual de até 5GW (CHEN, 2009).

Considerando essa classificação a mais alta em todos os sistemas de armazenamento de energia disponíveis, sua aplicação é voltada ao gerenciamento de energia, controle de frequência e fornecimento de reserva. Por outro lado, a problemática que esse sistema apresenta, refere-se à escassez de locais disponíveis, capazes de comportar dois grandes reservatórios e uma ou duas barragens. Ainda referente à essas áreas, é preciso considerar as condições em que elas se encontram, pois os custos com a construção, e questões ambientais que são parte de um longo prazo de duração, podem ser elevados (CANALES, 2015).

Ormonde (2015), relatou em seu estudo que as perdas energéticas na hidroacumulação acontecem devido a evaporação e dissipações no momento em que a energia é convertida. Com isso consegue estabelecer de 70 a 85% de eficiência. Canales (2015) relata que até 2011, a participação desse sistema abrangia 99% do armazenamento de energia elétrica mundial instalada, totalizando 140 GW de potência, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Capacidade mundial instalada de armazenamento de energia elétrica.



Fonte: IEA (2014)

Ormonde (2015) fez um comparativo entre algumas tecnologias usadas para o armazenamento energético e alguns parâmetros como rendimento de conversão, potência e aplicações foram evidenciadas como mostra a Figura 17. Nota-se que o processo de

hidroacumulação se destaca entre os outros pois é a tecnologia de armazenamento que suporta as maiores instalações de potência e também representa 99% do armazenamento energético mundial.

Figura 17 - Quadro comparativo entre as diferentes tecnologias de armazenamento.

Tecnologia	$\eta_{convers\tilde{a}o}$	Dissipação (em 24h)	Energia/Densidade de Energia	Potência	Principais aplicações	Observações
Volante de Inércia	85%	45%	100 – 140 Wh/kg	25 – 250kW	Regulador de tensão e frequência	Altas perdas dissipativas restringem seu uso apenas ao curto prazo. Sistema paralelizável e capacidade flexível
Ar comprimido	70%	desprezível ¹	50 - 300 MWh ²	De acordo com a usina térmica ³	Armazenamento sazonal, <i>storage trade</i>	Acoplado a ciclos térmicos Brayton, aumentando sua eficiência em regime permanente.
Baterias	65 - 90%	0,07 – 0,35%	20 – 200 Wh/kg	50 – 2000 W/kg	Amplio uso em aplicações móveis (eletrônicos e veículos)	Alta densidade energética e de potência, entretanto custo é muito elevado para larga escala
Supercapacitor	85 -98%	5%	5 – 60 Wh/kg	Até 10 kW/kg	Regulador de tensão, resposta a picos de demanda e KERS ⁴ veiculares	Alta densidade energética e de potência.
Hidroacumulador	70 - 85%	Desprezíveis	10 – 100 GWh ²	100 - 3000 MW	Armazenamento sazonal, <i>storage trade</i> e regularização de frequência	Representa 99% do armazenamento energético mundial

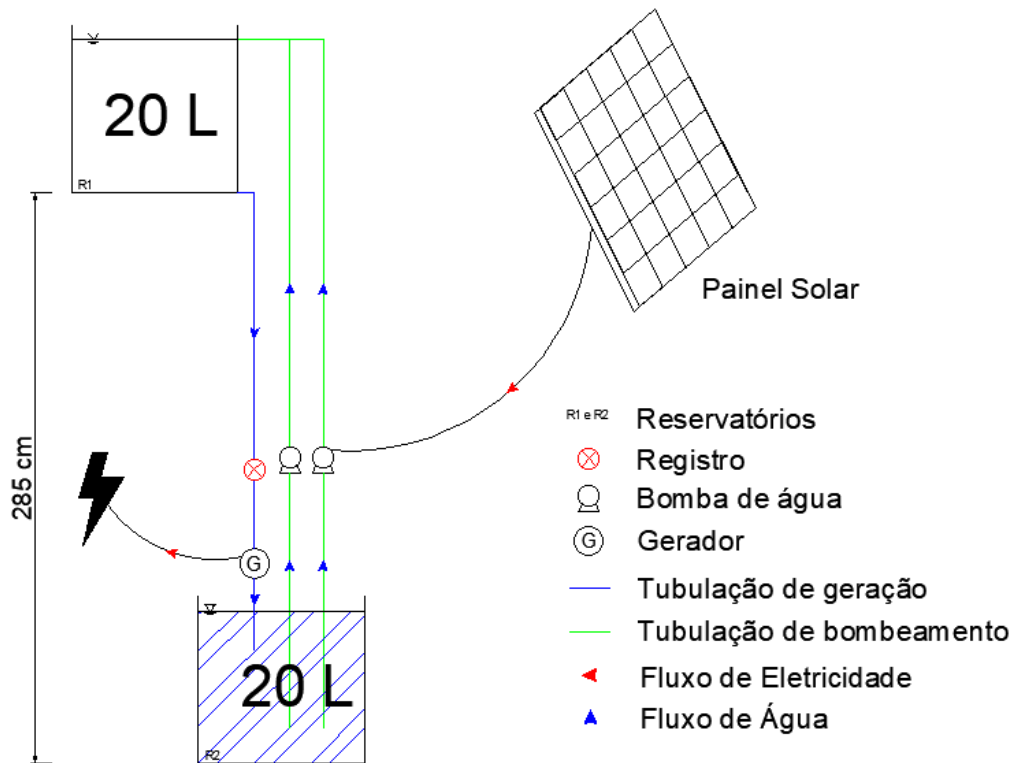
Fonte: Adaptado de Ormonde, P. (2015).

3 METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho de um sistema de geração de energia com acumulador hidráulico, foi construído um sistema de acumulação de energia que utiliza uma coluna de água combinado com energia solar fotovoltaica. O protótipo construído teve o intuito de permitir o estudo e avaliação do rendimento do sistema.

O protótipo construído consistiu na seguinte proposta: o abastecimento de energia contou com a geração de energia solar fotovoltaica, sendo responsável pelo fornecimento de eletricidade as bombas de água; o sistema de bombeamento foi responsável por elevar a água até o reservatório superior, possibilitando o armazenamento da energia gerada; e; o sistema de geração de energia hidrelétrica converteu a energia sob forma de energia potencial em energia elétrica. A Figura 18 apresenta o esquema do protótipo e os seus principais componentes, contendo a representação do sistema de bombeamento, do sistema responsável por acumular a energia e do sistema de geração de energia elétrica.

Figura 18 - Esquema do protótipo



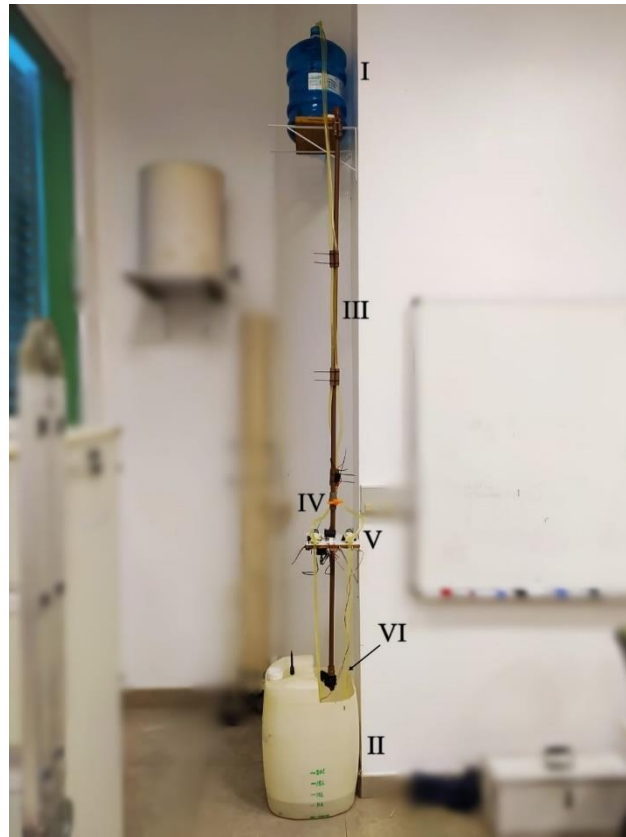
Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Para a construção do protótipo, foram utilizados os seguintes componentes:

- a) Um painel solar fotovoltaico;
- b) Um regulador de voltagem;
- c) Duas bombas hidráulicas;
- d) Dois reservatórios de água;
- e) Tubos e conexões e registro em PVC;
- f) Mangueiras de silicone;
- g) Fiação elétrica e interruptores de acionamento;
- h) Um gerador hidrelétrico de corrente contínua;
- i) Voltímetro digital de três dígitos.

De maneira simplificada, o funcionamento do protótipo consiste no bombeamento de água até o reservatório superior utilizando a energia solar. A água do reservatório, ao ser liberada na canalização de geração e conduzida até o gerador, converte o movimento da turbina em energia elétrica. A Figura 19 ilustra o protótipo montado no laboratório UFFS, onde todos os testes e procedimentos foram realizados.

Figura 19 – Protótipo



Fonte: fotografia registrada e adaptada pelo autor (2021)

Na Figura 19, é possível identificar os componentes (I) reservatório superior, (II) reservatório inferior, (III) canalização, (IV) válvula de acionamento, (V) bombas hidráulicas, (VI) turbina hidráulica. A altura do reservatório superior foi configurada de acordo com o máximo pé direito do laboratório onde foram instalados os experimentos, proporcionando assim a máxima energia potencial possível.

3.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA

Para o sistema de abastecimento de energia foi utilizado um painel solar fotovoltaico de 50W de potência que forneceu uma voltagem de aproximadamente 20V e uma corrente em torno de 2,77A, servindo como fonte de alimentação para as duas bombas hidráulicas elevarem um volume de 20 litros de água a uma altura 2,85m. A Figuras 20 ilustra o painel solar fotovoltaico utilizado

Figura 20 - Painel solar fotovoltaico.



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

Como a potência, a corrente e a voltagem nas saídas dos terminais do painel eram superiores a máxima suportada pelas bombas de água, optou-se por utilizar um regulador de voltagem entre os terminais do painel solar e a entrada de alimentação das bombas de água. Assim, foi possível ajustar a voltagem de alimentação das bombas em 13V e corrente de 2A, fornecendo energia suficiente para as bombas terem um bom funcionamento. A Imagem 21 apresenta o regulador de voltagem utilizado na alimentação das bombas.

Figura 21 - Regulador de tensão

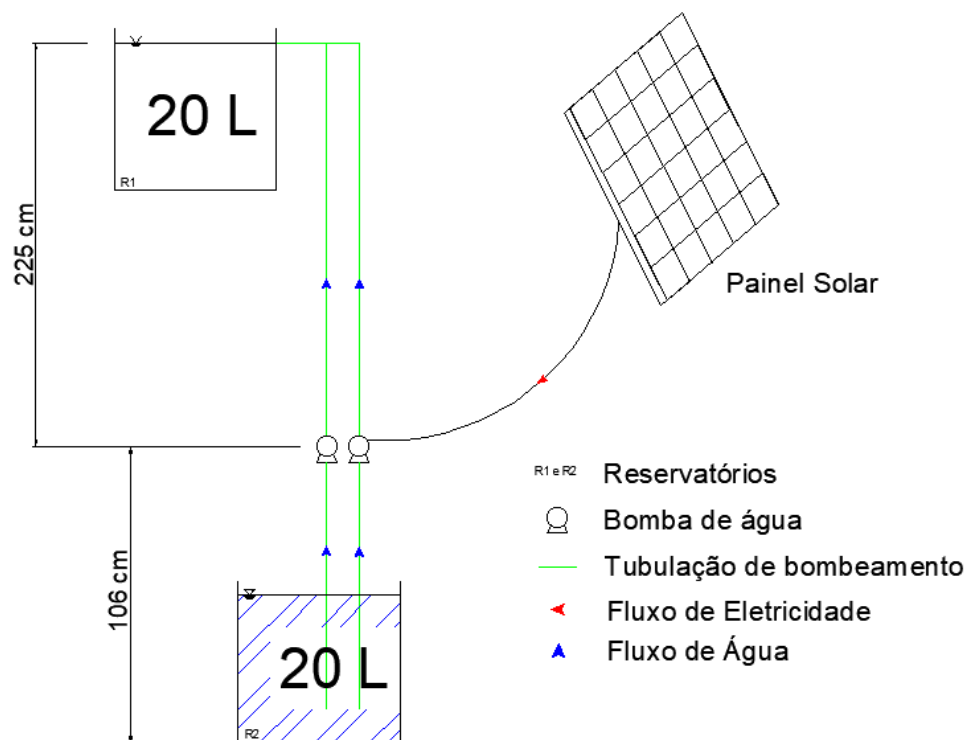


Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

3.2 SISTEMA DE BOMBEAMENTO

O sistema de bombeamento foi instalado para conduzir a água do reservatório inferior ao reservatório superior. O objetivo é o de armazenar parte da energia gerada pelo painel solar fotovoltaico através do recalque de água, sendo então as bombas de água alimentadas pela energia solar. Considerando a capacidade dos reservatórios, em cada simulação era elevada 20 litros de água do reservatório inferior até o reservatório superior. A Figura 22 apresenta um esquema com os componentes do sistema de bombeamento estudado.

Figura 22 - Sistema de bombeamento do protótipo.



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Para o sistema de bombeamento foram utilizadas duas mini bombas de água de 12V modelo RS385 de alto fluxo, que operam com corrente de máxima eficiência em torno de 2A e tensão entre 9V e 15V, permitindo elevação máxima de até 3 metros e altura de aspiração de até 2 metros, capaz de impulsionar entre 1500ml a 2000ml por minuto. As Figuras 23 e 24

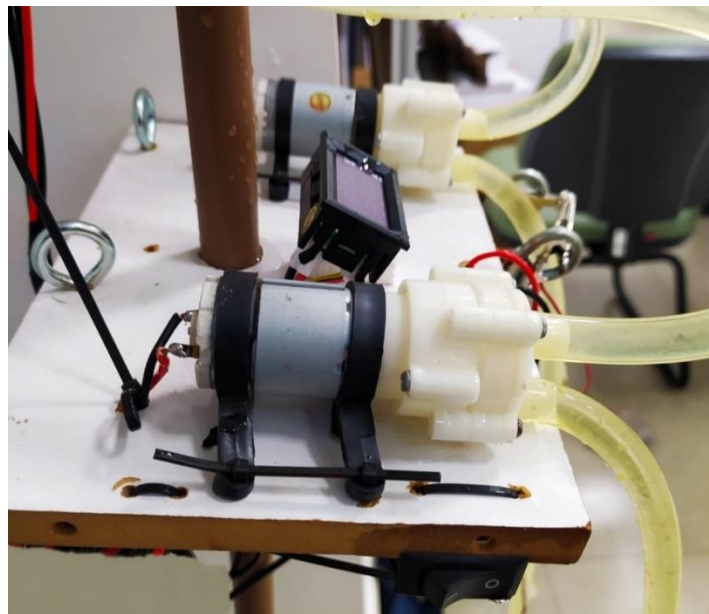
apresentam respectivamente a bomba 12V modelo RS385 utilizado no sistema e a unidade de bombeamento (no momento, ocorria o bombeamento).

Figura 23 - Modelo de bomba utilizado



Fonte: Adaptado de Usnainfo (2021, www.usnainfo.com.br)

Figura 24 - Unidade de bombeamento do sistema

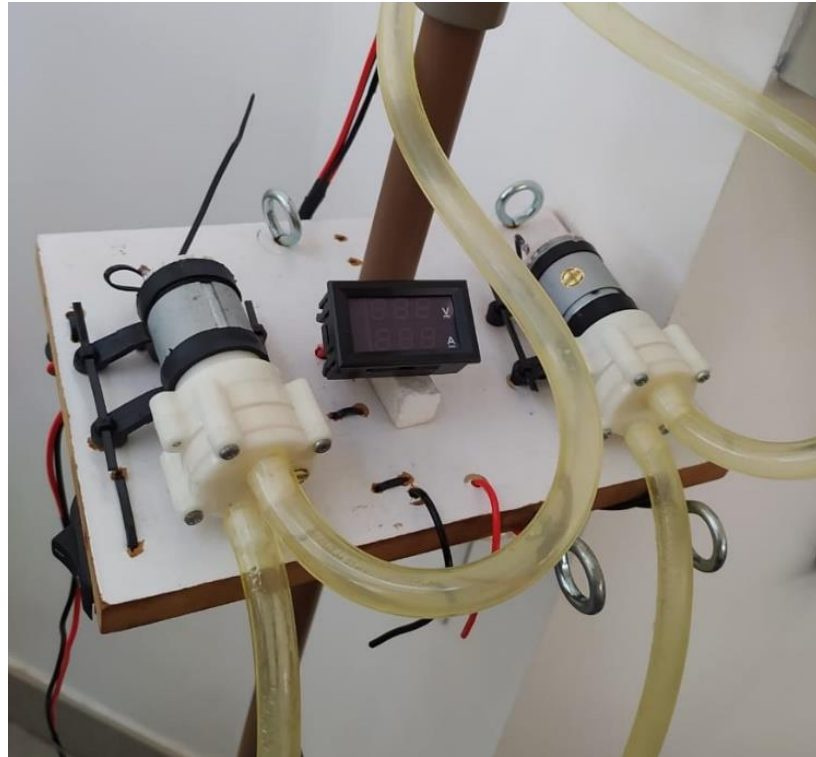


Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Em relação ao sistema de condução de água, para a sucção e recalque das bombas de água foram utilizadas mangueiras de silicone de 7 mm de diâmetro. A tubulação de recalque foi construída com 225 cm de mangueira e a de sucção com 106 cm de mangueira, considerando o posicionamento desde o fundo do reservatório inferior até o topo do reservatório superior.

Assim, o sistema de bombeamento realizou a elevação do fluido a uma altura de 331 cm. Através da Figura 25 podemos observar a unidade de bombeamento e parte de suas tubulações.

Figura 25 - Bombas de água na unidade de bombeamento do sistema.



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

3.2.1 Acúmulo de água

O acúmulo da água foi implementado em dois reservatórios de 20 litros. Como este trabalho é relacionado a questões ambientais foi tomada a decisão de empregar a reutilização de objetos descartados como reservatórios, então foi escolhido um galão de 50L de polietileno de alta densidade (PEAD) como reservatório inferior e um galão de 20L de polipropileno (PP). As Figuras 26 e 27 ilustram respectivamente a imagem do reservatório inferior e a do reservatório superior.

Figura 26 - Reservatório inferior



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021).

Figura 27 - Reservatório superior.



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021).

3.3 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A transformação do acúmulo de água do reservatório superior em energia elétrica foi realizada com a utilização de um mini gerador de energia hidráulica com capacidade de produção entre 7 e 15V e corrente de saída entre 128 e 260 mA. O mini gerador consiste de um pequeno motor elétrico desenvolvido com a finalidade de produzir energia por meio do fluxo de água, sendo um sistema turbina gerador hidrelétrico em escala reduzida. A Figura 28 ilustra o gerador utilizado.

Figura 28 - Gerador hidráulico do protótipo.



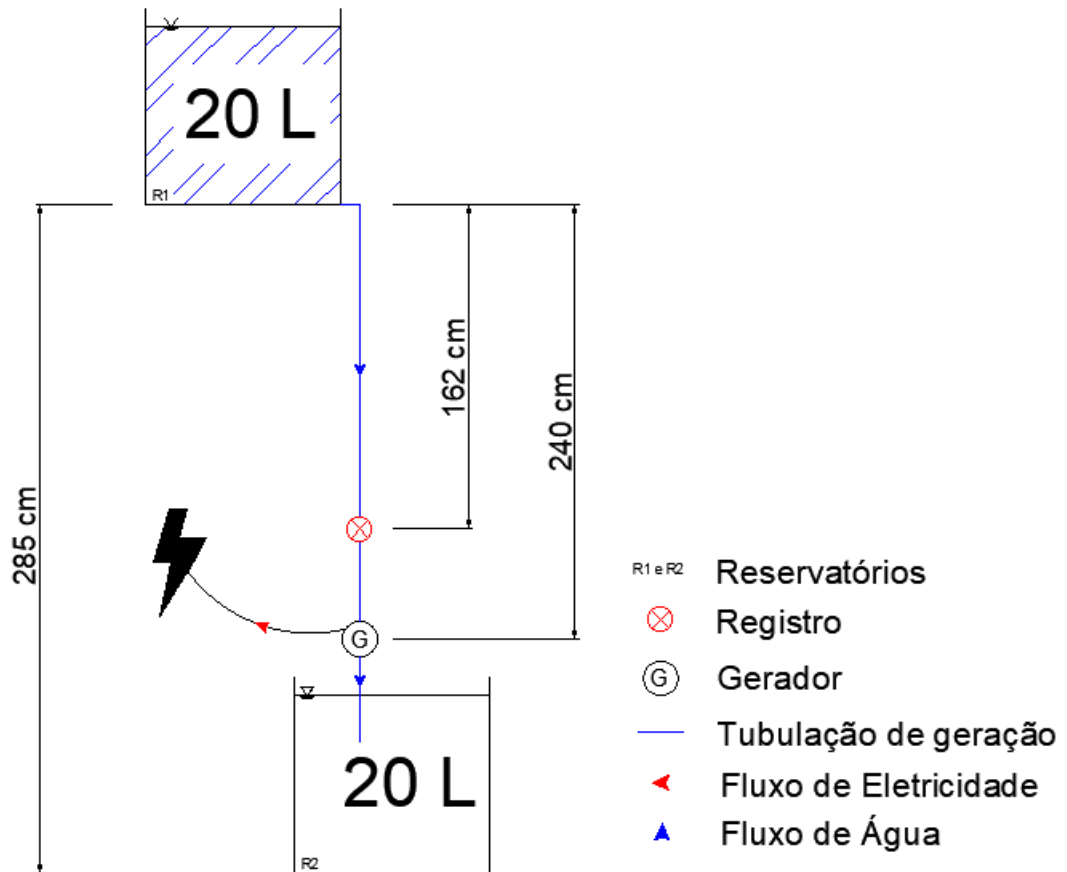
Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

No sistema proposto, a água contida no reservatório superior é conduzida por uma tubulação de PVC até o gerador hidrelétrico que foi posicionado 2,40 m abaixo do reservatório superior. O processo é iniciado após abrir uma válvula esférica de PVC posicionada 1,62 m abaixo do reservatório superior. A Figura 29 apresenta o esquema do sistema de geração estudado e seus componentes.

A utilização de uma válvula de PVC permitiu um controle dos valores vazão, ajustando assim a tensão na saída do gerador. Com a válvula totalmente aberta o gerador forneceu a tensão máxima observada, com a válvula parcialmente aberta os valores de tensão diminuam, pois o

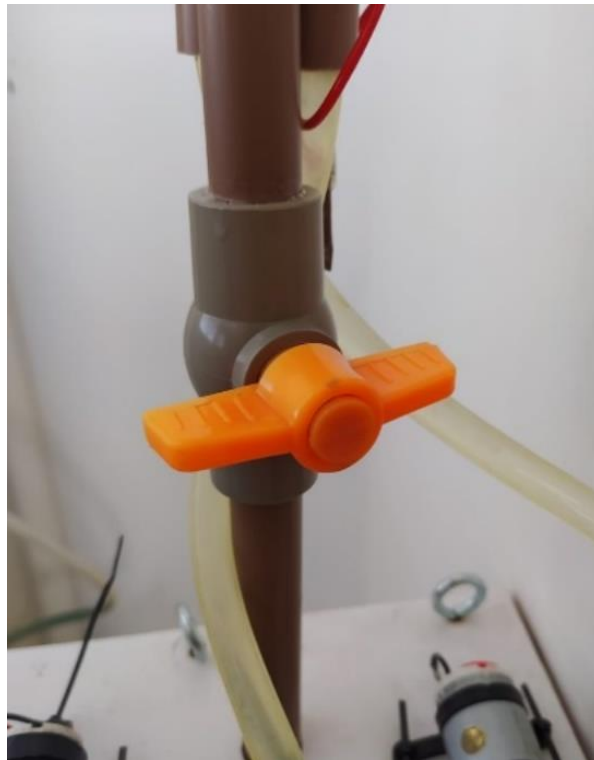
fluxo de água na turbina era menor. A Figura 30 ilustra a válvula de acionamento na posição fechada, momento em que acontece o acúmulo de energia.

Figura 29 - Sistema de geração de energia elétrica do protótipo.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 30 - Válvula de acionamento do sistema de Geração.



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

Para ter melhor clareza na leitura e também para ter um sinal do momento inicial da geração de energia elétrica do sistema hidráulico, foi adicionado um voltímetro digital alimentado pela própria energia gerada pela turbina hidrelétrica. O voltímetro digital realizou as leituras da voltagem gerada pela turbina, ilustrado na Figura 31. Esse voltímetro serviu apenas como forma demonstrativa e para mostrar que a turbina estava gerando energia pois ao utilizar a energia gerada pelo protótipo para o seu funcionamento ocorria interferência na leitura do mesmo, mostrando valores abaixo dos reais.

Figura 31 - Modelo de voltímetro do sistema de geração



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

Quando a válvula de acionamento era aberta, a água do reservatório superior era liberada e conduzida até a o gerador hidráulico, onde o fluxo de água movimentava a turbina do gerador e então a energia elétrica era gerada. Nesse momento o voltímetro digital ligava automaticamente indicando que o sistema estava gerando eletricidade. A Figura 32 ilustra o momento de geração de energia elétrica. Pode-se observar a válvula de acionamento na posição totalmente aberta e o voltímetro digital indicando uma tensão de 6,7 volts. A Figura 33 ilustra o gerador hidráulico no momento que estava gerando eletricidade.

Figura 32 - Sistema de Geração funcionando



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

Figura 33 - Gerador funcionando



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

A leitura dos valores de tensão e corrente que abasteceu o sistema de bombeamento foi realizada por meio de um multímetro, mostrado na Figura 34, ligado nos terminais de saída do regulador de tensão.

Figura 34 - Multímetro digital.



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

Para estimar as vazões de bombeamento e de geração foi utilizado um cronometro digital, apresentado na Figura 35. Com o cronômetro foram tomados os tempos de bombeamento e de geração de um volume de 20 litros de água.

Figura 35 - Cronometro digital.

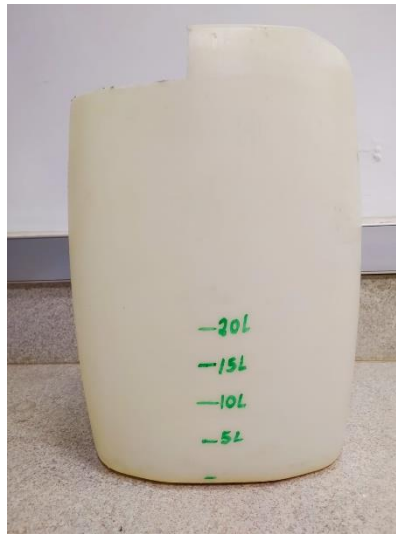


Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

3.5 PROCEDIMENTOS ADOTADOS

Para ter melhor exatidão e padronização dos procedimentos, no reservatório inferior, onde se encontrava as tubulações de sucção, foram feitas marcações de níveis de água de 5 em litros. Essas marcas serviram para registrar os valores de volume durante as medições, quando a água atingia esses níveis. Através das marcações, também pode-se identificar as variações do volume de água ao longo do tempo. A Figura 36 ilustra o reservatório inferior e os cinco níveis marcados que serviram como ponto de tomada de valores de corrente e tensão.

Figura 36 - Reservatório inferior



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

As medições realizadas foram utilizadas para analisar a quantidade de energia fornecida pelo painel solar para as bombas de água e para se estudar o tempo de recarga do reservatório superior. Os valores de corrente e de voltagem fornecidos ao sistema de bombeamento, foram obtidos com ajuda de um multímetro ligado nos terminais elétricos de saída do regulador de tensão, e o tempo de recarga com a utilização de um cronometro digital. A Figura 37 apresenta a imagem do regulador de tensão em funcionamento durante um teste de bombeamento.

Figura 37 - Regulador de tensão em funcionamento



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

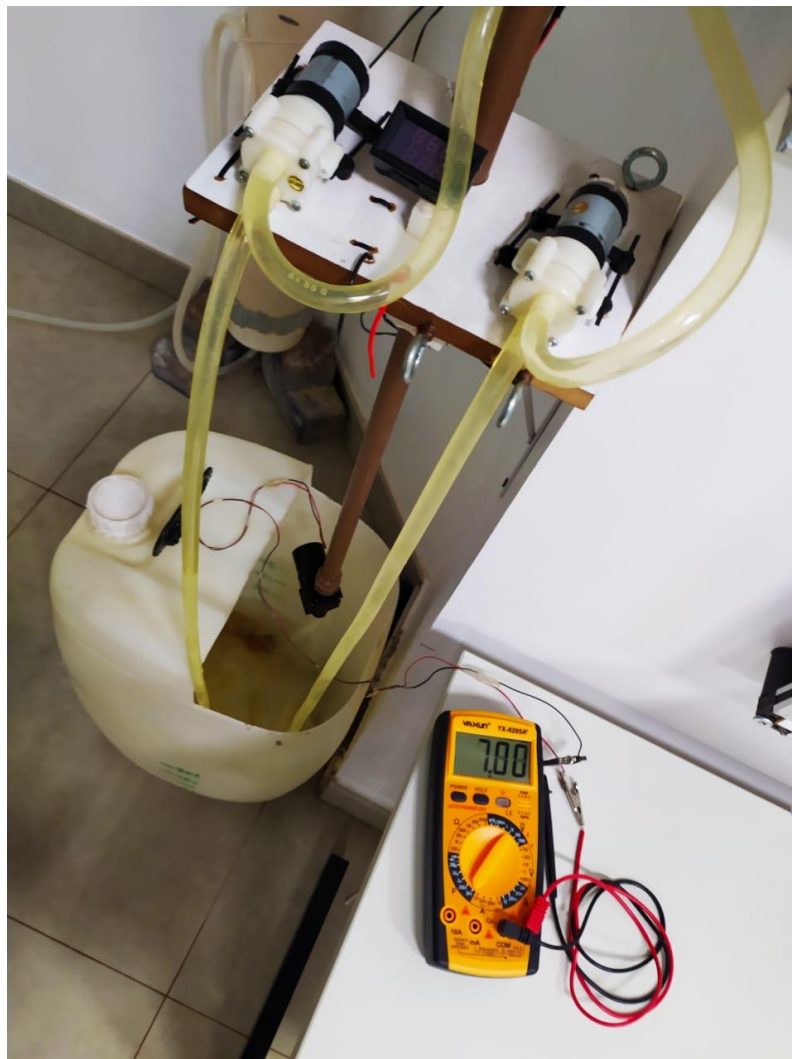
Com válvula de controle de fluxo de água fechada, o painel solar ligado ao regulador de voltagem, e este ligado ao sistema de bombeamento, o tempo de recarga do reservatório superior foi obtido com a ajuda de um cronômetro. Foi considerado o tempo em que as bombas de água levaram pra elevar 20 litros de água. O procedimento foi repetido diversas vezes, iniciando com o reservatório inferior na marca de 20L e encerrado no momento em que o nível atingia a marca zero. O acionamento das bombas foi realizado por uma chave liga e desliga, proporcionando maior agilidade para a operação.

Os testes realizados no sistema de geração tiveram como objetivo observar a quantidade de energia gerada a partir da energia potencial acumulada no reservatório superior. Para isso foram computados valores de corrente e tensão com a ajuda de um multímetro ligado diretamente nos terminais do gerador hidrelétrico, sem utilizar algo que consuma energia nos terminais do gerador no momento das medições, repetindo o procedimento para os diversos testes.

Cada coleta de valores do sistema de geração iniciou após o teste de bombeamento, que era finalizado assim que a marca de nível zero do reservatório inferior era alcançada. As bombas hidráulicas eram, então, desligadas e, em seguida, a válvula era aberta, possibilitando o fluxo de água, dando-se início ao funcionamento do gerador.

Durante cada teste eram computados os valores de corrente e tensão para diversas variações no nível de água do reservatório superior: na marca zero, na marca 5 litros, na marca 10 litros, na marca 15 litros e na marca 20 litros. Assim, em cada teste eram obtidos 5 valores de corrente e 5 valores de tensão e também foi observado o tempo de escoamento dos 20 litros de água do reservatório superior até o inferior, que correspondeu ao tempo de geração de energia elétrica. O teste era encerrado assim que todo o volume de água do reservatório superior era escoado até o inferior. Então, a válvula era novamente fechada e o protótipo estava pronto para iniciar um novo teste do sistema de bombeamento. A Figura 38 mostra o momento de um teste do sistema de geração.

Figura 38 - Teste do sistema de geração



Fonte: fotografia registrada pelo autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o desenvolvimento dos cálculos desta seção, a partir do protótipo desenvolvido, foi considerada uma queda d'água de 2,40 metros e um volume de 20 litros de água armazenados no reservatório superior do sistema. De forma a adequar o sistema de unidades, o volume de água, em metros cúbicos, é estimado em $0,02 \text{ m}^3$. Para os dutos de condução de água, foi selecionado um tubo de PVC com diâmetro de $1\frac{1}{2}$ ". Foi considerando para a água a massa específica de 1000 kg/m^3 . A aceleração da gravidade foi considerada como sendo $9,81 \text{ m/s}^2$.

O regulador de tensão adicionado nas saídas dos terminais elétricos do painel fotovoltaico manteve a corrente e a tensão constantes, fornecendo uma corrente de 2 amperes e tensão de 13 volts ao sistema de bombeamento. A potência estimada é de 26 watts. Demais dados e estimativas serão apresentados ao longo desta seção.

4.2 MEDIÇÕES HIDRÁULICAS PARA O SISTEMA DE BOMBEAMENTO

A capacidade de armazenamento é a máxima energia armazenável no sistema de acumulação, que corresponde a energia potencial gravitacional do sistema, e pode ser calculada através da Equação 13, onde U_{res} ou E_{pg} (em Joule) é a energia armazenada, ρ é a massa específica, V_{res} é o volume do reservatório e h é a altura do reservatório.

$$U_{\text{res}} = E_{\text{pg}} = \rho \cdot V_{\text{res}} \cdot g \cdot h \quad (13)$$

Através da solução da Equação 13 encontrou-se uma estimativa da energia potencial gravitacional armazenada pela coluna d'água do sistema. Considerando os valores citados para as variáveis da equação, a energia armazenada é estimada em 470,88 J.

O tempo de recarga é o tempo de bombeamento necessário para elevar os 20 litros de água do reservatório inferior até o reservatório superior. O tempo de bombeamento é fundamental para obter o consumo de energia do sistema de bombeamento. A Tabela 1 informa

o tempo de bombeamento necessário para elevar os 20 litros de água do protótipo, de acordo com 10 testes realizados.

Tabela 1 – Tempos de bombeamento para estimativa do tempo de recarga

Teste	Tempo de Bombeamento de 20L	Horas	Minutos	Segundos
1	06' 50''	0,11	6,83	410,00
2	06' 45''	0,11	6,75	405,00
3	06' 46''	0,11	6,77	406,00
4	06' 42''	0,11	6,70	402,00
5	06' 51''	0,11	6,85	411,00
6	06' 45''	0,11	6,75	405,00
7	06' 48''	0,11	6,80	408,00
8	06' 51''	0,11	6,85	411,00
9	06' 43''	0,11	6,72	403,00
10	06' 49''	0,11	6,82	409,00
MÉDIA	06'47''	0,11	6,78	407,00

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Calculando a média dos tempos de bombeamento da Tabela 1, encontrou-se tempo de recarga médio de 6 minutos e 47 segundos, que corresponde a 0,113 horas. A estimativa média é importante para evitar erros de medição. Com o volume do reservatório e o tempo de bombeamento médio, pode-se determinar a vazão de bombeamento, com a aplicação da Equação 2, onde t é o tempo. Através da Equação 14 estimou-se a vazão de bombeamento em 0,05 L/s, 2,97 L/min ou 0,178 m³/h (considerando diversos sistemas de unidade).

$$Q_{\text{bombeamento}} = \frac{V_{\text{res}}}{t_{\text{bombeamento}}} \quad (14)$$

4.3 MEDIÇÕES HIDRÁULICAS REALIZADAS PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO

A partir dos dados relativos ao período de funcionamento dos equipamentos, é possível ter uma estimativa sobre a vazão volumétrica de ambos os sistemas e também do comportamento dos componentes do sistema. A medida de tempo para a descarga do reservatório superior é uma estimativa importante do sistema.

O tempo de descarga do reservatório superior é o tempo de escoamento necessário para esvaziar o reservatório superior. Durante este período acontece a geração de eletricidade no gerador hidrelétrico. Enquanto a água estiver escoando, o gerador estará funcionando e haverá geração de eletricidade. A Tabela 2 informa o tempo de geração elétrica, que coincide com o tempo de descarga dos 20 litros de água do reservatório. Nesta etapa também foram realizados 10 testes.

Tabela 2 - Tempos de geração elétrica, considerando a descarga do reservatório superior.

Teste	Tempo de Descarga de 20L	horas	minutos	segundos
1	05'19''	0,09	5,32	319,00
2	05'21''	0,09	5,35	321,00
3	05'20''	0,09	5,33	320,00
4	05'22''	0,09	5,37	322,00
5	05'23''	0,09	5,38	323,00
6	05'31''	0,09	5,52	331,00
7	05'27''	0,09	5,45	327,00
8	05'19''	0,09	5,32	319,00
9	05' 22''	0,09	5,37	322,00
10	05'26''	0,09	5,43	326,00
MÉDIA	05'23''	0,09	5,38	323,00

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Determinando a média dos tempos de geração da Tabela 2, encontrou-se tempo de geração médio de 5 minutos e 23 segundos, que corresponde a 0,090 horas. Assim como no tempo de bombeamento, o tempo de geração é fundamental para se obter a quantidade de energia gerada pelo sistema de geração e para o cálculo da eficiência. A vazão a partir do reservatório superior é estimada a partir da Equação 14, observando-se que o tempo passa a ser

relativo ao esvaziamento do reservatório. Através dos dados médios estimados, tem-se que a vazão no sistema (considerando a etapa de geração) é de 0,062 L/s, 3,7 L/min ou 0,222 L/h.

Para fins de estimativa, também foram determinados os tempos parciais de escoamento, para diversos trechos do reservatório. Assim, foram computados tempos a cada fração de 5 litros do reservatório. Estes tempos são importantes, pois sabe-se que com a redução do volume do reservatório ocorre uma diminuição da pressão hidrostática no fundo do reservatório (em consequência, na entrada da tubulação). Com este fenômeno, ocorre um aumento no tempo de descarga e uma diminuição progressiva da vazão, para os diversos trechos. Os valores medidos podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Tempos de descarga por nível.

Volume	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Tempo 4	Tempo 5
0 L	0	0	0	0	0
05 L	01'08''	01'02''	01'11''	01'01''	01'13''
10 L	02,18''	02'15''	02' 19''	02' 20''	02,31''
15 L	03'31''	03'34''	03'40''	03'41''	03'45''
20 L	05'19''	05' 21''	05'20''	05'22''	05'23''

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

4.3 MEDIÇÕES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

Para avaliar o sistema de geração, foi realizada uma análise das medições do gerador de energia elétrica, avaliando a quantidade de energia gerada a partir da energia potencial acumulada no reservatório. Valores de corrente e tensão foram medidos, possibilitando determinações dos valores de potência elétrica.

Os valores de corrente e tensão obtidos sofreram alterações nas diferentes medições e no decorrer do escoamento, em cada medição. Conforme o nível de água do reservatório superior diminuiu, os valores de corrente e de tensão também decrescem, devido as variações no escoamento. Por conta disso, o valor considerado é determinado a partir de 10 medições. Os valores médios de corrente e tensão do sistema de geração foram estimados em 7 volts e 0,075 amperes. A partir dos valores encontrados é possível estimar os valores de potência, resultando em 0,53 watts de potência média com desvio padrão de 0,052 e variância 0,0027.

A Tabela 4 ilustra os valores de tensão gerada, em volts (V), nos 5 níveis de água do reservatório durante o escoamento de cada teste. A Tabela 5 ilustra os valores de corrente gerada, em amperes (A), nos 5 níveis de água do reservatório durante o escoamento de cada teste. Nas tabelas, σ indica o desvio padrão para as medições realizadas.

Tabela 4 - Valores de tensão de cada teste, em volts (V), para a geração de energia.

Teste	0L	5L	10L	15L	20L
1	7,56	7,17	6,98	6,76	6,68
2	7,62	7,13	6,90	6,80	6,65
3	7,59	7,23	7,08	6,87	6,62
4	7,38	7,15	6,91	6,74	6,51
5	7,35	7,18	6,95	6,75	6,47
6	7,47	7,24	7,12	6,91	6,72
7	7,49	7,14	7,03	6,86	6,63
8	7,44	7,21	7,03	6,90	6,73
9	7,43	7,18	6,98	6,83	6,75
10	7,42	7,26	7,10	6,85	6,70
Média	7,48	7,19	7,01	6,83	6,65
σ	0,09	0,04	0,08	0,06	0,09

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Tabela 5 - Valores de corrente de cada teste, em amperes (A), para a geração de energia.

TESTE	0L	5L	10L	15L	20L
1	0,080	0,078	0,074	0,071	0,067
2	0,080	0,078	0,077	0,075	0,072
3	0,080	0,078	0,075	0,073	0,069
4	0,083	0,079	0,076	0,072	0,070
5	0,080	0,078	0,077	0,075	0,072
6	0,079	0,078	0,073	0,073	0,070
7	0,079	0,078	0,073	0,071	0,068
8	0,082	0,079	0,078	0,075	0,073
9	0,080	0,077	0,072	0,071	0,070
10	0,081	0,078	0,075	0,072	0,073
Média	0,080	0,078	0,075	0,073	0,071
σ	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Considerando níveis de tensão e corrente contínuos nos terminais de saída do gerador, é possível calcular a potência elétrica produzida pelo gerador. A Tabela 6 apresenta a potência elétrica calculada para as dez medições, os valores foram estimados pela seguinte Equação 15, onde P é a potência (em watts, W), V é a voltagem (em volts, V) e I é a amperagem (em amperes,

A). Calculando a média dos valores de potência da Tabela 5, estimou-se, a partir da Equação 15, a potência média do sistema de geração de 0,53 Watts.

$$P = V \cdot I \quad (15)$$

Tabela 6 - Valores de potência calculados utilizando os valores observados na geração de energia.

TESTE	0L	5L	10L	15L	20L
1	0,601	0,557	0,514	0,481	0,450
2	0,611	0,559	0,533	0,508	0,481
3	0,605	0,561	0,528	0,499	0,459
4	0,613	0,566	0,522	0,485	0,458
5	0,589	0,563	0,537	0,504	0,468
6	0,587	0,563	0,523	0,501	0,468
7	0,593	0,556	0,512	0,490	0,453
8	0,607	0,570	0,547	0,515	0,489
9	0,591	0,554	0,504	0,482	0,475
10	0,602	0,567	0,533	0,496	0,488
Média	0,600	0,562	0,525	0,496	0,469
σ	0,009	0,005	0,013	0,011	0,014

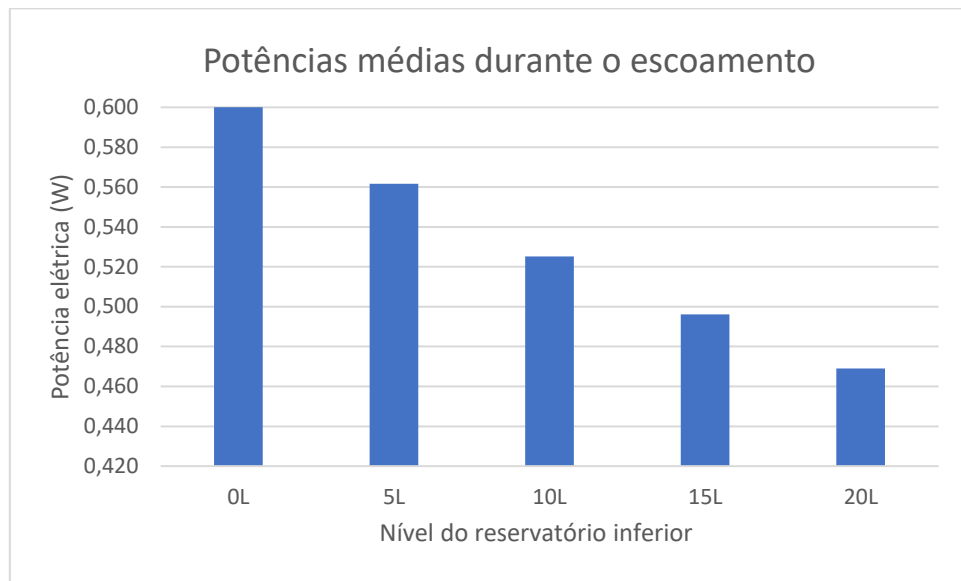
Fonte: elaborado pelo autor (2021)

De maneira análoga, foi calculada a potência de abastecimento do sistema de bombeamento, utilizando os valores de corrente e tensão obtidos na entrada do sistema de bombeamento (medidas de voltagem e amperagem nas bombas hidráulicas). A estimativa foi realizada através da solução da Equação 16, onde a voltagem média estimada é de 13 volts e a amperagem estimada é de 2 amperes, resultando assim em um valor de 26 Watts, relativo à potência consumida.

$$P_{Consumida} = V_{Fornecida} \cdot I_{Fornecida} \quad (16)$$

A Figura 39 ilustra os valores de potência do gerador, em cada nível do reservatório inferior durante o escoamento, utilizando os valores da Tabela 6. Analisando o gráfico fica evidente que os valores de potência decaem conforme o nível do reservatório superior diminui.

Figura 39 - Potências durante o escoamento por nível de água



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

4.3.1 Cálculo da Energia consumida e gerada

A quantidade de energia consumida por um sistema ou aparelho elétrico, expressa em watts vezes hora (Wh), pode ser calculada fazendo a multiplicação da potência que abastece o sistema (P , em Watt) pelo tempo de funcionamento em horas (Δt , em segundos), conforme a Equação 17. No caso, o valor de energia consumida pode ser obtido multiplicando a potência fornecida pelo painel solar fotovoltaico pelo tempo de bombeamento necessário, para elevar 20 litros de água. A partir dos valores estimados, considerando uma potência de 26 watts e o tempo de 0,113056 horas, estima-se uma potência consumida de 2,94 Wh.

$$E = P \cdot \Delta t \quad (17)$$

Do mesmo modo, podemos obter a quantidade de energia gerada pelo sistema, em Wh, através da multiplicação da potência gerada pelo tempo de escoamento. Considerando a potência média gerada de 0,53 watts e o tempo médio de 0,09 horas, estima-se uma potência de 0,05 Wh.

4.3.2 Eficiência

A eficiência do sistema de geração do protótipo pode ser determinada pela relação entre a energia gerada pelo gerador instalado no protótipo dividido pela energia fornecida/consumida pelas bombas, para elevar os 20 litros de água do reservatório inferior para o superior. A relação é indicada pela Equação 18. Através dos valores obtidos, de 0,05 Wh de energia gerada e de 2,94 Wh de energia fornecida, a eficiência do sistema é estimada em 0,017, ou 1,7%.

$$\text{Eficiência do protótipo} = \frac{E_{gerada}}{E_{consumida}} = \frac{P_{gerada} \cdot \Delta t_{descarga}}{P_{consumida} \cdot \Delta t_{bombeamento}} \quad (18)$$

4.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Analisando as informações obtidas nas medições realizadas, é possível constatar diferenças e considerações importantes entre o sistema de bombeamento e geração e também sobre os diversos equipamentos que compõem todo o protótipo e o seu funcionamento. Em relação ao sistema de bombeamento, devido ao uso do regulador de tensão na entrada da alimentação das bombas, os valores de corrente e tensão não apresentaram variações significativas entre os cinco níveis de medição, permanecendo os valores de 2 A e de 13 V.

A partir das medições realizadas, verificou-se que o tempo médio para bombear o volume total de 20 litros ao reservatório superior, localizado a 2,85 metros de altura, foi de 6 minutos e 45 segundos, enquanto que o tempo médio de descarga foi de 5 minutos e 20 segundos. Quanto as vazões de bombeamento e de geração, a de bombeamento se manteve ligeiramente menor que a do sistema de geração, a vazão de bombeamento em torno de $2,97 \frac{L}{min}$ e a de geração $3,70 \frac{L}{min}$. Indicando assim uma vazão cerca de 17% maior no sistema de geração de energia.

A tensão de saída do sistema de geração se manteve inferior à tensão fornecida para acionamento do sistema de bombeamento, sendo que a maior tensão medida com o gerador operando não superou 7,7 V, tensão menor do que a tensão para acionamento da bomba, que foi de 13 V. Igualmente, a corrente elétrica produzida pelo gerador, foi em torno de 0,53 A, também foi de menor intensidade do que a corrente fornecida ao sistema de bombeamento para bombear o volume de 20 litros de água, equivalente a 2 A. O resultado final indicou uma potência média gerada muito abaixo do valor de energia fornecido ao sistema, fato que corroborou com a baixa eficiência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem vários meios de se realizar o armazenamento de energia elétrica. Considerando questões ecológicas e ambientais, surge-se a necessidade de buscar meios eficientes e não poluentes para tal finalidade. Tratando dos sistemas fotovoltaicos isolados, onde o meio de armazenamento mais utilizado são os bancos de baterias (que ocasionam impactos ambientais), o estudo de um sistema acumulador de energia alternativo, que utiliza o bombeamento de água como forma de acumular, pode colaborar para o desenvolvimento de tecnologias limpas e sustentáveis.

Neste trabalho foram abordados alguns dos principais tipos de energias renováveis, considerando os mais utilizados. Também, foram apresentadas algumas das formas mais comuns de armazenamento de energia. O armazenamento de energia elétrica refere-se a um processo de conversão de energia elétrica em uma forma que pode ser armazenada, para posteriormente ser convertida novamente em energia elétrica. Esse processo permite que a eletricidade seja armazenada em momentos de baixa demanda e alta produção, para ser utilizada em períodos ou momentos de alta demanda e baixa produção.

No experimento realizado a energia gasta para o armazenamento (2,94 Wh) foi superior a energia gerada (0,05 Wh). Comparando a energia fornecida ao sistema de bombeamento e a gerada pela turbina hidráulica, os resultados mostram uma eficiência baixa, de 1,7%. A diferença entre as vazões indica que para que os sistemas de geração e de bombeamento alcancem valores semelhantes, seria necessário aumentar o fornecimento de potência para a bomba. Com isso, a resultante indicaria uma eficiência ainda menor, o que indica que a eficiência pode estar atrelada ao fato de que a potência do sistema de bombeamento deve ser menor.

Ainda, com o experimento obtido, é possível inferir que para que o sistema hidráulico tivesse maior eficiência, para o armazenamento seria necessário que houvesse um reservatório de maior tamanho, posicionado em maior altura, e assim o gerador utilizado pudesse ter um maior rendimento, aumentando a eficiência do sistema.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica - Brasília: ANEEL, 2002.

AHEARNE J. **Storage of electric energy, Report on research and development of energy technologies.** International Union of Pure and Applied Physics; 2004, p. 76–86.

BRAGA, R.P **Energia Solar Fotovoltaica Fundamentos e Aplicações.** Rio de Janeiro: Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2018. 80p.

CALIJURI, Maria do Carmo/ **Engenharia ambiental: conceitos tecnologias e gestão/** Maria do Carmo Calijuri, Davi Gaspari Fernandes Cunha. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C.A. B. **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas.** *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 1230-1249, 2015

CARRINGTON, D. **Queda espetacular nos custos de energia renovável leva a um aumento global recorde.** *O guardião*.2017

CARVALHO, W. **Biologia em foco.** São Paulo: FTD, 348 p., 2002

CHANDEL, S.S., Nagaraju Naik, M., Chandel, R., 2015. **Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies.** *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 1084–1099. doi:10.1016/j.rser.2015.04.083.

CHEN HS, Cong NT, Tan C, et al. **Progress in electrical energy storage system: A critical review.** *Progress in Natural Science* 19, 291–321. 2009.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações.** CRESESB, 2006.

DENHOLM, P.; ELA, E.; KIRBY, B.; MILLIGAN, M. **The role of energy storage with renewable electricity generation: Technical Report.** Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2010.

ENERGIA SOLAR. Blogleiturafavre consultado www.blogdofavre.ig.com/tag/energia-solar. Acessado em 20/04/2021, às 19:00h.

ENERGIASOLAR.Sistemafotovoltaica consultado em www.fazfacil.com.br/ref orma-construção/energia. Acessado em 20/04/2021, as 20:00h.

FOTOVOLTAICA. **Usina solar Fotovoltaica em Tauá no CEARÁ** consultado em www.economia.ig.com.br.2012. Acessado em 20/04/2021, as 20:30h.

FOTOVOLTAICA. **Sistema conectados à rede elétrica, isolados, híbridos e usinas solares** consultadoemwww.americadosol.org/energia_fotovoltaica/sistemas_fovoltaico. Acessado em 21/04/2021, as 19:00h.

IBRAHIM, H.; ILINCA, A.; PERRON, J. **Energy storage systems—characteristics and comparisons. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 5, p. 1221-1250, 2008.

IEA, **INTERNATIONAL ENERGY AGENCY**. Technology Roadmap: Energy Storage. Paris, 2014.

KOTO, S.M. **Fontes renováveis para produção de energia elétrica: estudo de caso de duas fontes-eólica e fotovoltaica**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009. 60p.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Solar para a produção de eletricidade**. 1ª edição, São Paulo: Artliber Editora, 2012.

Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar – CTES. Edição Especial PRC-PRODEEM. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

MEAH, K., Fletcher, S., Ula, S., 2008. **Bombeamento solar fotovoltaico de água para locais remotos**. Renovar. Sustentar. Energy Rev. 12, 472-487.2008.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira Exercício de 2019**. www.mme.gov.br/Publicações_e_Indicadores.

NASCIMENTO, R. L. **Aproveitamento da energia dos oceanos para produção de eletricidade**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017.

ORMONDE P., **Dimensionamento de um Sistema de Geração de Energia Fotovoltaica com Hidroacumulação e Regularização de Energia**, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014970.pdf>. Acessado em: 09 de maio de 2021.

PEREIRA, F. **Energy storage systems (sistemas de armazenamento de energia)**. Neutro à Terra n. 12, p. 17-28, 2013.

REQUENA, M. **Células solares, fundamentos e aplicações**. Rio Claro: UNESP. 2009.

ROSEN, M. A.; DINCER, I.; KANOGLU, M. **Role of exergy in increasing efficiency na sustainability and reducing environmental impact**. *Energy Policy*, v. 36, p. 128-137, 2008.

RUTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis: UFSC / LABSOLAR, 2004. 118p.

SHUTTERSTOCK, disponível em: www.shutterstock.com/pt/image-photo/pumped-storage-hydropower-plant-upper-reservoir-1719639220

TOLMASQUIM, MAURICIO T. et al. **Alternativa energética sustentável no Brasil**. Editora Relume Dumará. Rio de Janeiro, 2004.

WINDPOWER, disponível em www.windpowerengineering.com/pumped-hydro-storage-market-to-surpass-350-billion-by-2024/

YUKSEL, I. **Hydropower for sustainable water and energy development**. *Renewable and sustainable Energy Reviews*, Technical Education Faculty, Department of Construction, Sakarya University, 54187 Sakarya, Turkey. v.14, p. 462-469, 2010.