

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

DANIELA BRAGHINI

**EFICIÊNCIA DA UTILIZAÇÃO COMBINADA DE ENERGIA  
FOTOVOLTAICA COM ENERGIA POTENCIAL PARA COGERAÇÃO  
E REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CAMPINAS/SP  
2023

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

DANIELA BRAGHINI

**EFICIÊNCIA DA UTILIZAÇÃO COMBINADA DE ENERGIA  
FOTOVOLTAICA COM ENERGIA POTENCIAL PARA COGERAÇÃO  
E REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Graduação apresentado por Daniela Braghini, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos, da Faculdade de Tecnologia de Campinas, elaborado sob a orientação da Prof. Dra. Juliana Canto Duarte e coorientação do Prof. Dr. Fábio Mazzariol Santiciolli

CAMPINAS/SP  
2023

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**CEETEPS - FATEC Campinas - Biblioteca**

B813e

BRAGHINI, Daniela

Eficiência da utilização combinada de energia fotovoltaica com energia potencial para cogeração e redução de consumo de energia elétrica. Daniela Braghini. Campinas, 2023.

62 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Processos Químicos  
Faculdade de Tecnologia de Campinas.

Orientador: Prof. Dra. Juliana Canto Duarte.

1. Energia fotovoltaica. 2. Energia potencial gravitacional.  
3. Cogeração de energia. 4. Energia limpa. I. Autor. II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 621.47

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG PQ 23.1

**Daniela Braghini**

**Eficiência da utilização combinada de energia fotovoltaica com energia potencial para cogeração e redução de consumo de energia elétrica**

Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Processos Químicos, pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Fatec Campinas.

Campinas, 19 de junho de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Juliana Canto Duarte  
Fatec Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Nelson Maniasso  
Fatec Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Mônica Frigeri  
Fatec Campinas

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Alécio, por seu profissionalismo e por me auxiliar a realizar e finalizar este trabalho de graduação de curso.

Aos meus professores e orientadores Fábio e Juliana por acreditarem que seria capaz de realizá-lo, me auxiliando com toda sua experiência e competência.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus filhos, Filipe e Henrique, que durante todo o caminho percorrido para minha formação, me incentivaram nos momentos em que pensei em desistir.

Aos meus pais, José e Maria, pelo dom da minha vida.

A minha irmã gêmea Andrea por todo o incentivo e exemplo de determinação e perseverança.

## RESUMO

A procura por novas fontes alternativas de energia está cada vez mais presente nos dias atuais; uma vez que o consumo de energia elétrica no Brasil aumentou expressivamente com o crescimento populacional, industrial e agrícola; ao passo que a poluição e degradação ambiental crescem significativamente na mesma proporção. Por esse motivo, se faz necessário a utilização de fontes de energias limpas, que causam menos impactos ao meio ambiente, e que não dependam exclusivamente de recursos hídricos, tornando-se um ponto chave para o desenvolvimento econômico do país. Com este enfoque, propõe-se neste trabalho, através de estudo experimental, uma alternativa do uso combinado de fontes de energias limpas (a fotovoltaica e a potencial gravitacional), utilizando o princípio da conservação e da cogeração de energia e com o mínimo de impacto e de custos; além de se esperar como resultado o maior aproveitamento da geração de energia e conseqüentemente a redução do consumo da energia elétrica convencional.

**Palavras-chave:** energia fotovoltaica; energia potencial gravitacional cogeração de energia; energia limpa.

## **ABSTRACT**

The search for new energy sources has been intense nowadays since the electricity consumption in Brazil has increased significantly with populational, industrial and agricultural growth, meanwhile pollution and environmental degradation grown at the same rate. Therefore, it is necessary to use clean energy sources which cause less impact on the environment and do not depend only on water resources exclusively. It has become a key point for the country's economic development. This work proposes through an experimental study, an alternative of the combined use of clean energy sources (photovoltaic and gravitational potential), using the principle of conservation and cogeneration of energy and with minimal impact. and costs. In addition, it is expected a greater efficiency in the use of the generated energy, consequently, the reduction of consumption of conventional electric energy.

**Keywords:** photovoltaic energy; potential gravitational energy; energy cogeneration; clean energy.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Esquema de funcionamento da célula fotovoltaica.....	17
<b>Figura 2</b> – Junção dos semicondutores tipos N e P.....	18
<b>Figura 3</b> – Estimativas de criação de valor com reciclagem de painéis até 2050. ....	20
<b>Figura 4</b> – Escoamento em regime permanente. ....	22
<b>Figura 5</b> – Ciclo hidrológico da água. ....	23
<b>Figura 6</b> – Conservação da massa em um escoamento incompressível não viscoso.....	28
<b>Figura 7</b> – Representação do limite entre escoamento laminar e turbulento.....	30
<b>Figura 8</b> – Ciclo diurno do projeto.....	33
<b>Figura 9</b> – Ciclo noturno do projeto.....	34
<b>Figura 10</b> – Placa Eletrônica do Arduino Uno. ....	36
<b>Figura 11</b> – Placa Shield SD-card para uso com a placa Arduino.....	36
<b>Figura 12</b> – Esquema de montagem do circuito supervisorio proposto. ....	37
<b>Figura 13</b> – Ciclo noturno do projeto.....	37
<b>Figura 14</b> – Mini Gerador Hidrelétrico modelo F50-12V.....	38
<b>Figura 15</b> – Bomba d'água periférica escolhida.....	43
<b>Figura 16</b> – Micro Inversor Solar Hoymiles Mi-700lv 700W.....	44
<b>Figura 17</b> – Modelo do sistema proposto.....	45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Especificações técnicas da microturbina. ....	38
<b>Tabela 2</b> – Comparativo entre os modelos de placas Arduino .....	39
<b>Tabela 3</b> – Geração de energia elétrica de uma microturbina .....	40
<b>Tabela 4</b> – Especificações da bomba periférica.....	42
<b>Tabela 5</b> – Especificações do inversor escolhido. ....	44
<b>Tabela 6</b> – Descrição do custo estimado do sistema sugerido.....	55

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
	1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	11
	1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
	1.3 OBJETIVOS .....	14
	1.4 HIPÓTESES .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
	2.1. ENERGIA SOLAR.....	16
	2.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	16
	2.2.1. Painéis solares e o meio ambiente.....	19
	2.3. ENERGIA HIDRÁULICA .....	21
	2.3.1. Massa.....	24
	2.3.2. Pressão .....	25
	2.3.3. Vazão.....	25
	2.3.4. Perda da carga .....	26
	2.3.5. Equação da continuidade para regime permanente .....	27
	2.3.6. Número de Reynolds.....	29
	2.3.7. Equação de Bernoulli.....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	32
	3.1 MATERIAIS .....	32
	3.1.1. Descrição dos materiais.....	32
	3.2 METODOLOGIA.....	37
	3.2.1. Dimensionamento do sistema proposto .....	37
	3.2.2. Vazão da bomba .....	41
	3.2.3. Volume da caixa d'água.....	42
	3.2.4. Bomba d'água .....	42
	3.2.4. Escolha do painel solar e inversor.....	43
	3.2.5. Calculando as perdas no sistema.....	44
	3.2.6. Dimensionamento do custo sistema proposto.....	54
	3.2.7. Comparativo com soluções existentes no mercado .....	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	57
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	59

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo Rodrigues *et al* (2017), o emprego de fontes renováveis de energia não é novidade. De fato, as primeiras aplicações datam de séculos atrás, fazendo parte da própria história da humanidade. O homem, durante toda a sua evolução, extraiu da natureza os recursos necessários para a saciar as suas necessidades ou realizar suas atividades, quase todas as vezes considerando a natureza como uma fonte infinita de recursos.

Muito avanço no campo de energias renováveis e fontes alternativas tem sido obtido decorrente do crescente aumento da demanda por energia elétrica e da pressão pela busca de fontes de energias limpas (SOSNOSKI, 2015).

Conforme Pacheco (2006), as energias renováveis são aquelas provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda energia disponível na Terra e, por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta.

A energia do Sol transformada em eletricidade, conhecida como energia solar fotovoltaica, é uma fonte de energia limpa e renovável, pois não lança emissões indesejáveis e é decorrente da natureza inesgotável do Sol.

Segundo Fadigas (2012), o descobrimento em 1839 da energia solar ser transformada em energia elétrica deve-se ao físico francês Alexandre Edmond Becquerel, um dos pioneiros em pesquisas sobre o efeito fotovoltaico.

Da energia solar originam-se indiretamente outras fontes de energia, como a eólica, hidráulica, biomassa, energia dos oceanos e combustíveis fósseis. A energia térmica, por exemplo, utiliza a radiação solar para aquecimento de fluidos e também para a geração de potência mecânica ou elétrica, podendo ser transformada espontaneamente em energia elétrica, por intermédio da ação de alguns materiais, como o fotovoltaico e termoelétrico. Tais materiais semicondutores, quando submetidos aos efeitos da radiação (calor e luz), convertem diretamente a energia solar em energia elétrica.

Na célula fotovoltaica, quando a radiação atinge o átomo do semicondutor, este libera um elétron que pode ser conduzido pelo campo elétrico interno, conduzindo dessa maneira a corrente pela célula fotovoltaica (BRITO, 2006).

Para Reis (2011), a geração de energia através das células fotovoltaicas não é realizada o tempo todo, por conta da variação do horário e incidência da luz solar. Por isso, toda a energia armazenada em baterias se torna essencial. Durante o período noturno, as baterias servem para deixar o cliente reabastecido até a manhã do dia seguinte.

De acordo com Linden (2002), as baterias eletroquímicas podem ser utilizadas em sistemas fotovoltaicos, uma vez que convertem a energia química contida nos seus materiais ativos em energia elétrica através da reação de oxidação-redução. Caso o sistema seja recarregável, a inversão deste processo possibilita que a bateria seja recarregada, com transferência de elétrons de um material para outro por intermédio de um sistema elétrico.

Para pequenos sistemas, como sistemas domésticos, a solução mais comum para se acumular a eletricidade fotovoltaica é baseada em baterias eletroquímicas, comumente de níquel-cádmio ou chumbo (BRITO, 2006).

O uso do metal lítio para composição de baterias primárias de alto desempenho e baterias secundárias nas últimas décadas se destacou pois o lítio é atraente como material de ânodo de bateria por causa de sua leveza, alta tensão, alta equivalência química e boa condutividade (LINDEN, 2002).

Já para Reis (2011), quando se conecta um sistema fotovoltaico à rede elétrica, ao contrário do que se pensa, o sistema fica dependente da concessionária de energia, pois, em dia nublado, a primeira geração fica totalmente comprometida e é interrompida no período noturno; voltando a funcionar somente no dia seguinte.

A geração de energia com uso de células fotovoltaicas pode ser feita através de dois sistemas. O sistema on grid é aquele onde a geração de energia das células fotovoltaicas é ligada diretamente a rede de distribuição energética. Já o sistema off grid, é aquele em que toda energia é armazenada em baterias, e elas que têm sua ligação direta a rede de distribuição (PINHO; GALDINO, 2014).

Ultimamente, com reduções de custos significativas, aumento de potência e vida útil, as baterias de íons de lítio estão sendo cada vez mais utilizadas em sistemas de baterias estacionárias (NYKVIST; NILSSON, 2015).

A energia solar fotovoltaica está entre as mais abundantes na superfície terrestre e sendo inesgotável, é uma das opções mais prósperas para seu uso em muitos países, compondo a nova matriz energética (VERMA; MIDTGARD; SATRE, 2011).

Conforme Kapadia (2004), o uso produtivo da energia é o aproveitamento da energia elétrica ou não elétrica (calor ou energia mecânica) para atividades que melhorem os ingressos econômicos e o bem-estar das pessoas.

Para a segurança energética do país como também para a diversificação da matriz elétrica, as fontes renováveis contribuem como solução para as demandas de energia elétrica locais (LOPES, 2015).

Em âmbito mundial, a energia fotovoltaica tem seu uso em expansão uma vez que essa tecnologia apresenta muitas vantagens, como modularidade e facilidade de instalação, o que a torna ideal para uso ou produção doméstica, em aplicações que precisem de baixa ou grande potência (CORTEZ, 2013).

De acordo com Bortoloto *et al* (2017), o sistema fotovoltaico possui várias prerrogativas como o fato de ser uma energia limpa e renovável de fácil portabilidade, de instalação simplificada em locais isolados, com custos reduzidos.

Espera-se que até 2040, a energia solar fotovoltaica seja a fonte renovável mais importante para o mundo (BRITO *et al.*, 2011).

Segundo Nascimento (2004), quando se evita o gasto de energia elétrica convencional, derivada pela utilização da energia solar, há benefícios para a economia e impedem-se perdas ambientais, como a importante tarefa de conscientização ambiental e sociocultural pelo uso de uma energia limpa e gratuita.

A reciclagem dos resíduos perigosos dos metais presentes em baterias deve ser analisada, uma vez que está associada ao valor econômico dos metais presentes em suas composições como lítio, cobalto e cobre. Desta forma, os ganhos avaliados estão relacionados não só a termos ambientais como em termos econômicos (CALGARO, 2012)

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A busca por novas fontes alternativas de energia está cada vez mais presente nos dias atuais. No atual cenário brasileiro, com o crescimento populacional, industrial e agrícola, o consumo de energia aumentou-se significativamente, somado às estiagens recorrentes que prejudicam a oferta de energia.

Por esse motivo, a necessidade de se utilizar fontes de energias limpas, que causam menos impactos ao meio ambiente, e que não dependam exclusivamente dos recursos hídricos, tornou-se um ponto chave para o desenvolvimento econômico.

Com a escassez cada vez maior de recursos e com o aumento de custos de produção, há necessidade de viabilizar estudos que possam promover a reutilização de energia de recursos de forma ecologicamente correta.

Com este foco, propõe-se neste trabalho, através de estudo experimental, uma alternativa do uso combinado de fontes de energias limpas (a fotovoltaica e a potencial gravitacional), utilizando o princípio da conservação e da cogeração de energia e, com o mínimo de impacto, de custos e esperando como resultado o maior aproveitamento da geração de energia e conseqüentemente a redução do consumo da energia elétrica convencional.

Com este trabalho deseja-se objetar ao seguinte problema de pesquisa: Será que o uso combinado de energias renováveis pode ser uma das alternativas para a cogeração de energia e redução de consumo de energia elétrica?

## 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o uso de energia limpa para a produção e consumo de energia elétrica, analisando a viabilidade de se combinar energia fotovoltaica com energia potencial gravitacional.

Também foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Avaliar o uso combinado de energias limpas para redução do consumo de energia elétrica;

- b. Medir a eficácia da cogeração de energia através de um modelo de conceito experimental;
- c. Analisar, através do estudo, o impacto da combinação de uma ou mais energias renováveis para a redução da utilização da energia elétrica.

## 1.4 HIPÓTESES

Como hipóteses foram apresentadas as seguintes:

1. O uso combinado de energias limpas reduz o consumo da energia elétrica.
2. Energias renováveis impactam significativamente no consumo de energia elétrica convencional.
3. O estudo proposto, que mescla o uso conjunto de dois tipos de energias renováveis, apresenta eficácia para a redução do uso de energia elétrica e possibilita o seu consumo consciente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ENERGIA SOLAR

O Sol é uma fonte natural de energia que se assemelha a uma esfera ardente, com tamanho 110 vezes maior que o planeta Terra, com distância de 150 milhões de quilômetros (MANUAL, 1978), sendo capaz de fornecer anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia pela radiação solar, para a superfície terrestre (CRESESB, 2006).

Conforme descrito no Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2002), energia solar é o termo comumente utilizado para designar principalmente a energia solar térmica e fotovoltaica, sendo que as demais fontes de energia (biomassa, eólica, hidráulica, dos mares e fóssil) podem ser consideradas formas indiretas da energia solar.

### 2.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Pode-se definir energia solar fotovoltaica como a energia produzida decorrente da luz do Sol; quanto maior a radiação solar, mais quantidade de energia gerada. Por esse motivo, é uma das soluções mais otimistas para a composição de uma nova matriz energética mundial, com seu aproveitamento consolidado em muitos países (VERMA; MIDTGARD; SATRE, 2011).

Para Pinho (2014), a energia solar fotovoltaica é definida como a energia obtida por intermédio da conversão direta da luz solar em eletricidade, utilizando-se da célula fotovoltaica que é um dispositivo fabricado com material semicondutor.

Segundo a CEPEL (2006), o efeito fotovoltaico acontece em materiais semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra totalmente “vazia” (banda de condução).

Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, ela apenas mantém um fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Dá-se o nome de “Efeito Fotovoltaico” para esse fenômeno (NASCIMENTO, 2004).

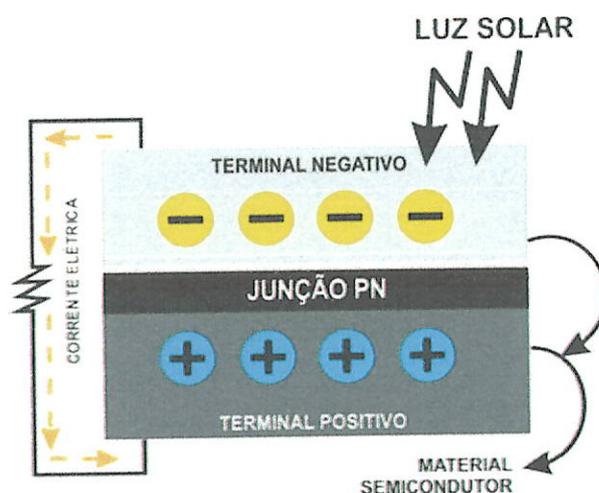
Segundo CEMIG (2012), o efeito fotovoltaico é produzido por essa incidência que, além de fazer circular uma corrente elétrica no material, cria a energia elétrica. Através do efeito fotovoltaico há o desenvolvimento da diferença de potencial entre os dois eletrodos, devido à transferência de elétrons gerados entre as bandas diferentes do material.

Para Young (2009), o efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons que ocorre quando a luz, com comprimento de onda adequado, incide sobre uma superfície. Os elétrons absorvem energia da radiação incidente e, portanto, podem superar a atração das cargas positivas e serem libertados da superfície. Essa atração produz uma barreira de energia potencial que geralmente mantém os elétrons confinados no interior do material.

No que diz respeito ao material utilizado, conforme esquematizado na Figura 1:

As células fotovoltaicas, dispositivo elétrico que converte a luz do Sol em energia elétrica, são fabricadas com materiais semicondutores, sendo o silício o mais comum. Sua estrutura é formada por camadas – uma positiva, na parte inferior, outra negativa, na parte superior – unidas por uma grade finíssima. Como a luz solar é composta de partículas que carregam energia, os fótons, o papel das células fotovoltaicas é absorver parte deles, provocando a liberação dos elétrons do material semicondutor, gerando eletricidade. A eletricidade é gerada em corrente contínua e precisa passar por um inversor, que converte a corrente contínua em alternada (ABGD, 2021, p.10).

**Figura 1** – Esquema de funcionamento da célula fotovoltaica.



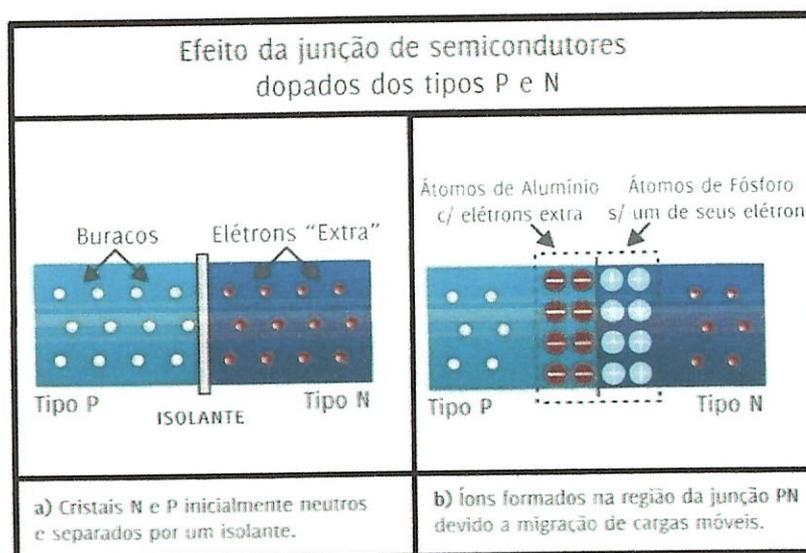
Fonte: Autoria própria

De acordo com Nascimento (2004)

A célula fotovoltaica de silício cristalino, é composta por duas camadas de silício dopadas com diferentes impurezas. A camada n orientada para o Sol está dopada negativamente com elementos do V grupo da tabela periódica, como por exemplo o fósforo, e a camada p inferior, está dopada positivamente com elementos do III grupo da tabela periódica como por exemplo o boro, nas suas partes frontal e posterior são impressos contatos metálicos. A parte frontal da célula fotovoltaica é feita de nitrato de silício ou de dióxido de titânio, deverá ser translúcida quanto possível. Aqui os contatos são essencialmente aplicados na forma de uma grelha fina e a reflexão da luz solar pode ser reduzida até abaixo de 5%, com o depósito por vapor de uma camada mais fina (camada de antirreflexo). As perdas podem ser ocasionadas pela recombinação, reflexão e pelo sombreamento entre os contatos frontais, na célula solar. Uma parte da energia não aproveitada é absorvida e transformada em calor.

Atualmente as células fotovoltaicas são produzidas utilizando o silício (Si) e podem ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo (CRESESB, 2006). Nos painéis solares com células de silício purificado 99,999%, Melo (2022) exemplifica que a camada geradora composta por silício contém três regiões: a superfície (semicondutor dopado tipo N), o recheio ou meio (neutra) e a traseira (semicondutor dopado tipo P), conforme apresentado na Figura 2.

**Figura 2** – Junção dos semicondutores tipos N e P



Fonte: PAULA. ALVES. MATEUS. 2011. Pág. 128.

Na dopagem das células de silício puro, também conhecidas como “Wafers”, a camada traseira (lado P) são contaminadas de forma controlada com boro, portador de carga positivas, enquanto que a superfície (lado N) é dopada com fósforo, portador de carga negativas. O silício (Si), sendo um elemento do grupo 14 da tabela periódica, apresenta 4 elétrons na sua camada de valência. Na confecção da célula fotovoltaica, para a dopagem positiva (tipo P), utiliza-se o boro (família 3A) com 3 elétrons na camada de valência e para a dopagem negativa (tipo N), o fósforo (família 5A) com 5 elétrons. Desse modo, serão formadas cargas positivas e negativas ao longo do semicondutor (ENERGIA TOTAL, 2022).

Separadamente, ambas as camadas são eletricamente neutras. Porém, ao serem unidas, na região P-N, cria-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Com a luz solar incidindo na célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N” (NASCIMENTO, 2004).

A luz solar, ao incidir sob a célula fotovoltaica, produz uma pequena corrente elétrica; que por intermédio de fios ligados à célula, é transferida para os demais componentes do sistema. Dessa forma, quanto maior o número de células fotovoltaicas (ligadas em séries ou em paralelo), maior a produção de corrente e de tensão (PEREIRA *et al.*, 2006).

### **2.2.1. Painéis solares e o meio ambiente**

Os painéis solares por serem compostos de materiais como silício, vidro, alumínio e plástico, podem ser reutilizados em novos painéis solares ou em outros produtos. A reciclagem de painéis solares pode ajudar a reduzir a quantidade de lixo eletrônico e a evitar a extração de novos materiais, que são necessários para produzir novos painéis solares. De acordo com um estudo publicado em 2020 pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a reciclagem de painéis solares pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 300 milhões de toneladas até 2050.

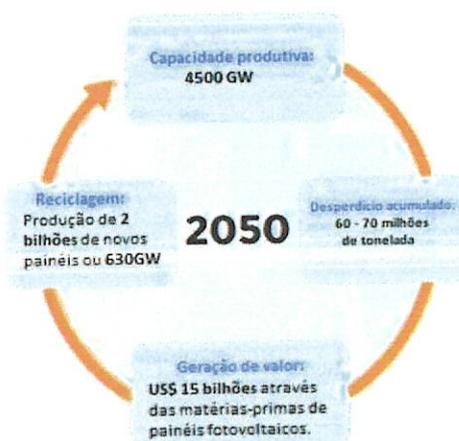
O processo de reciclagem de painéis solares é relativamente novo e ainda está sendo desenvolvido. Atualmente, existem poucas instalações de reciclagem de painéis solares em todo o mundo, mas espera-se que esse número aumente à medida que a demanda por reciclagem aumente. Além disso, a reciclagem de painéis solares pode gerar empregos verdes e ajudar a desenvolver uma economia circular mais sustentável.

Um estudo publicado em 2019 pelo Centro de Estudos Avançados em Energia (CAES) mostrou que a reciclagem de painéis solares poderia criar até 45.000 empregos nos Estados Unidos até 2030. No entanto, a reciclagem de painéis solares ainda enfrenta desafios técnicos e econômicos, como o custo elevado do processo de reciclagem e a falta de incentivos para a reciclagem. De acordo com um estudo publicado em 2021 na revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, a falta de regulamentação e incentivos governamentais pode desencorajar a reciclagem de painéis solares em alguns países.

No Brasil, a reciclagem de placas solares é uma questão que vem ganhando importância à medida que o país aumenta a sua capacidade de produção de energia solar. De acordo com a ABSOLAR (2021), o Brasil alcançou recentemente a marca de 10 GW de capacidade instalada de energia solar, o que representa um crescimento de mais de 300% nos últimos três anos.

De acordo com ReciclaBR (2023), já existem algumas iniciativas de reciclagem de placas solares no país, como uma empresa de reciclagem em São Paulo, que é capaz de reciclar cerca de 95% dos materiais presentes nas placas solares, como alumínio, vidro, plástico e silício.

**Figura 3** – Estimativas de criação de valor com reciclagem de painéis até 2050.



Fonte: IRENA (2016, pag. 13) adaptado.

Com o aumento da produção de energia solar, a reciclagem de placas solares se torna cada vez mais relevante. De acordo com a IRENA (2016), estimativas preliminares sugerem que as matérias-primas tecnicamente recuperáveis de painéis fotovoltaicos poderia render cumulativamente até 2050 um valor de US\$ 15 bilhões, equivalentes a 2 bilhões de painéis, ou 630 GW, conforme apresentado na Figura 3.

Embora ainda haja desafios a serem superados, a reciclagem de placas solares é uma questão importante que pode ter um grande impacto na sustentabilidade da energia solar no Brasil. A implementação de programas de reciclagem em larga escala pode ajudar a reduzir a quantidade de lixo eletrônico e a evitar a extração de novos materiais, além de gerar empregos verdes e promover uma economia circular mais sustentável.

### 2.3. ENERGIA HIDRÁULICA

Desde os tempos mais remotos, a energia hidráulica vem sendo utilizada pelo homem e, pode ser considerada como sendo a energia obtida a partir da energia potencial da água e pode ser convertida de diversas maneiras; contudo, a mais usada é a transformação da energia potencial da água em energia mecânica (JÚNIOR *et al.*, 2013).

Para Shames (1995), um fluido se define como uma substância que muda sua forma continuamente sempre que submetida a um esforço constante, sem importar o quão pequeno seja.

Segundo BRUNETTI (2008),

A definição de fluido é introduzida, normalmente, pela comparação dessa substância com um sólido. A definição mais elementar diz: Fluido é uma substância que não tem uma forma própria, assume o formato do recipiente (...). Os fluidos são, portanto, os líquidos e os gases, sendo que estes ainda se distinguem dos primeiros por ocuparem todo o recipiente, enquanto os líquidos apresentam uma superfície livre.

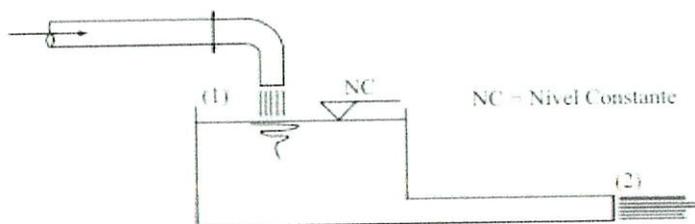
A hidrodinâmica estuda o movimento de um fluido denominado fluido ideal, considerando-o com um fluido teórico, que escoar sem perdas de energia por atrito (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

Para Brunetti (2008), um fluido ideal é aquele cuja viscosidade é nula; portanto, deduz-se que seja um fluido que corre sem perdas por atrito. Já o fluido incompressível é definido como sendo aquele em que sua massa específica não varia com a pressão.

O regime permanente se caracteriza por um escoamento em que as propriedades dos fluidos permanecem constantes com o passar do tempo. Considera-se regime variado como aquele em que as características dos fluidos analisados mudam de instante em instante (STREETER; WYLIE, 1982).

De acordo com Brunetti (2008), o regime permanente é todo aquele no qual as propriedades dos fluidos se mantêm invariáveis em cada ponto com o passar do tempo; isso significa que, mesmo que um fluido esteja em movimento, a configuração de suas características permanecerá as mesmas, conforme apresentado na Figura 4.

**Figura 4** – Escoamento em regime permanente.



Fonte: Brunetti (2008, pág,83)

Observa-se que na Figura 4, a quantidade de água que entra em (1) é igual a quantidade de água que sai por (2); portanto, a velocidade, a massa específica e a pressão (nessas condições configurando as propriedades do fluido), em cada ponto, serão as mesmas em qualquer instante.

Em dinâmica dos fluidos praticamente quase todos os processos envolvem a utilização de energia; por esse motivo, é uma magnitude Física que se apresenta sob diversas perspectivas, participa em todos os processos de mudança de estado, se transforma, se transmite, depende do sistema de referência e se conserva, fixada a este (BUCUSSI, 2006).

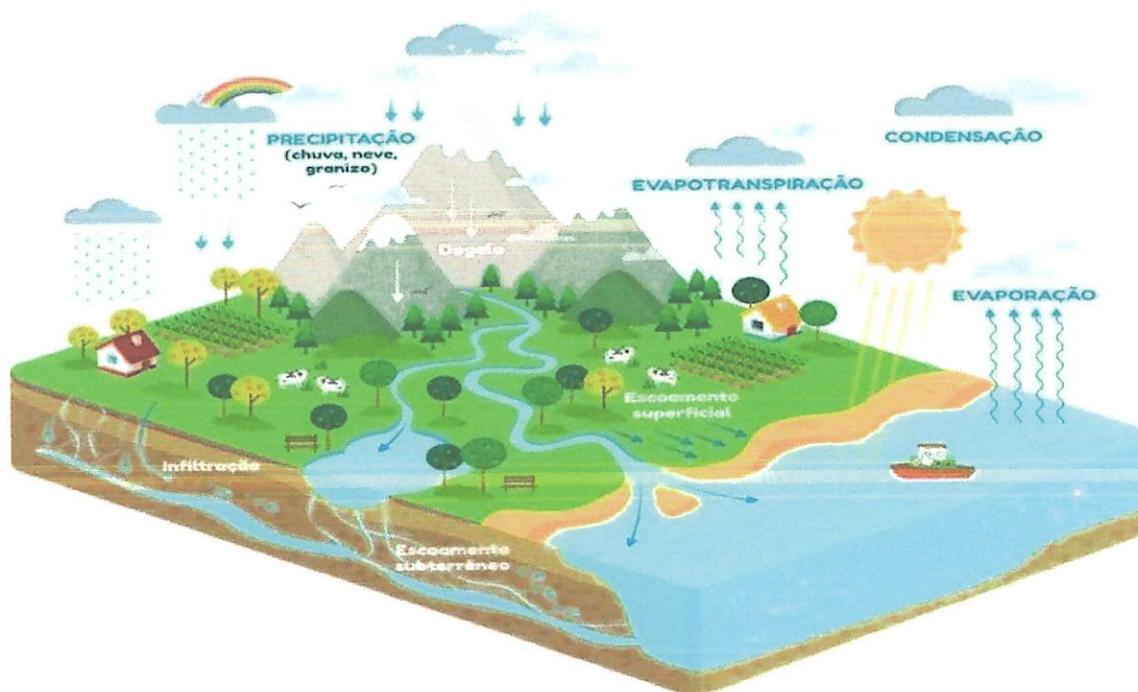
Ao analisar o escoamento de um fluido, deve-se considerar alguns fundamentos como o princípio de conservação de energia, a perda de carga em condutos e o princípio de conservação da massa. Conforme Giles (1974), para as deduções das equações referentes a estes fundamentos, adota-se o escoamento como em regime permanente por uma linha de corrente.

O Princípio da Conservação de Energia é baseado no significado de energia e determina que a energia pode ser transformada ou transferida, porém, nunca destruída ou criada. Então, tal princípio está intrinsicamente interligado ao conceito de energia.

Uma vez que a energia é transformada e não criada, conforme Azevedo (2009), um sistema hidráulico pode transformar e conservar a energia primeiramente recebendo energia mecânica a partir de energia elétrica ou térmica de um motor de combustão interno ou elétrico. Em seguida, esta energia mecânica se transforma em energia potencial hidráulica através da bomba. No processo, a energia hidráulica transferida para o fluido, decorre por conexões, válvulas e em seguida é transferida para um motor hidráulico que transformará essa energia em energia mecânica manifestada através de força, velocidade ou torque.

Silva (2014) declara que a energia hidráulica, assim como a energia da biomassa, não é considerada uma fonte fundamental de energia, mas sim o resultado da energia gravitacional e da irradiação solar, sendo responsável pela evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Ciclo hidrológico da água.



Fonte: EPAL (<http://www.epal.pt/EPAL/menu/epal/comunicação-ambiental/ciclo-da-água>, acessado em 26 de maio de 2023)

Para Linsingen (2003), um sistema hidráulico é considerado como um conjunto de elementos físicos favoravelmente combinados que, utilizando um fluido como via de transferência de energia, permite a transmissão e controle de forças e movimentos.

O termo energia hídrica frequentemente é associado a algo diferente, no entanto, trata-se do mesmo tipo de energia. Uma das utilizações da energia hidráulica é para gerar energia elétrica, esse processo de converter energia potencial da água em eletricidade, através de geradores elétricos, ocorrem em grandes obras denominadas usinas hidrelétricas (JÚNIOR *et al.*, 2013).

A força das águas, utilizada desde os primórdios da humanidade, é transferida para uma série de máquinas de movimentos rotatórios através de eixos, hastes, roldanas, polias, cabos e engrenagens. Para Macintre (1997), as máquinas motrizes são as que convertem a energia mecânica em trabalho mecânico.

Já as máquinas geratrizes são aquelas que recebem trabalho mecânico e o transformam em energia hidráulica, trabalho mecânico esse geralmente fornecido por máquinas motrizes. As bombas hidráulicas funcionam basicamente convertendo energia mecânica em energia hidráulica, transportando fluidos dentro do sistema.

Por essa razão, Varon (2013) determina bomba como “máquinas que transformam energia mecânica em energia hidráulica; sendo que a energia mecânica é provida por um artefato motriz a qual é decomposta em energia hidráulica pela ação da bomba”.

Quando se necessita aumentar a pressão de um fluido, conduzindo-o pela tubulação de um determinado local a outro do sistema hidráulico, monitorando as condições de vazão e pressão pelo processo, há a necessidade de utilização de bombas (GOUVEA, 2008; SOUZA, 2014).

### **2.3.1. Massa**

Para Brunetti (2008), considerando os fluidos como sendo um meio contínuo e homogêneo, as propriedades médias coincidem com as propriedades nos pontos. Dessa forma, é possível efetuar a definição simples para todas as propriedades dos fluidos. Então, a massa específica de um fluido é massa de um fluido por unidade de volume:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(1)

Em que:

m = massa

V = volume

### 2.3.2. Pressão

Uma força aplicada sobre determinada superfície pode ser decomposta em dois efeitos: um tangencial que causa as tensões de cisalhamento e, outro normal, que originará às pressões. A pressão pode ser descrita, conforme Baptista (2003) como a razão existente entre uma força normal incidente sobre a área de uma base considerada plana, de um determinado objeto, que se apoia na superfície de pressão.

Para Brunetti (2008), a pressão num ponto equivale a razão entre a força normal agindo numa superfície e pode ser expressa por:

$$p = \frac{dF_n}{dA},$$

(2)

Onde:

dF<sub>n</sub> = força normal

dA = área da superfície

### 2.3.3. Vazão

A descarga ou vazão, conceituada por Delmée (2003) equivale ao volume que escoar por uma seção (de um tubo) por unidade de tempo (hora, minuto, segundo, etc.), e pode ser representada por:

$$Q = \frac{V}{t}$$

(3)

Em que:

Q = vazão em determinado trecho

V = volume de líquido que passa por esse trecho

t = unidade de tempo em que ocorre o escoamento.

Um fluido escoar em regime permanente (estacionário), quando o campo de velocidade não varia com o tempo. Nesta ocasião, e considerando que o fluido seja incompressível, a vazão pode ser calculada pela equação 3, pois o volume é o produto da área (A) pelo comprimento da tubulação e a velocidade (v) é a razão do comprimento pelo tempo (NUSSENZVEIG, 2004).

#### **2.3.4. Perda da carga**

A perda de carga, segundo Baptista (2003), é composta pela variação do nível da linha de energia na linha de corrente em dois pontos quais tomados num escoamento.

Já para Brunetti (2008) ela refere-se a energia cedida do fluido ao atrito das paredes internas durante o seu escoamento.

Enquanto que para Mattos e Falco (1998), a perda de carga pode ser considerada como sendo a energia por unidade de peso que é desperdiçada ao decorrer da tubulação pelo atrito.

Considerando que a passagem de um fluido através de tubos sofre a interferência das paredes e de obstáculos no seu interior, é sabido que sempre haverá perda de energia ou dissipação de energia decorrente do atrito.

Segundo Fox (2010), as perdas de cargas distribuídas sucedem nos trechos retilíneos da tubulação com geometria da área interna constante, ao passo que as perdas de cargas localizadas ocorrem em trechos específicos dos condutos como curvas, válvulas, saídas, derivações, etc.

### 2.3.5. Equação da continuidade para regime permanente

Conforme descrito por Baptista (2003), a lei da conservação de massa, que estabelece que a massa não pode ser criada ou destruída, institui-se que a equação da continuidade pode ser estabelecida, considerando que a soma dos fluxos que chegam num nó é igual à soma dos fluxos que saem do mesmo nó, sendo representada da seguinte forma:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i = F_j \quad (4)$$

Em que:

$Q_i$  = vazão em determinado trecho  $i$ ,

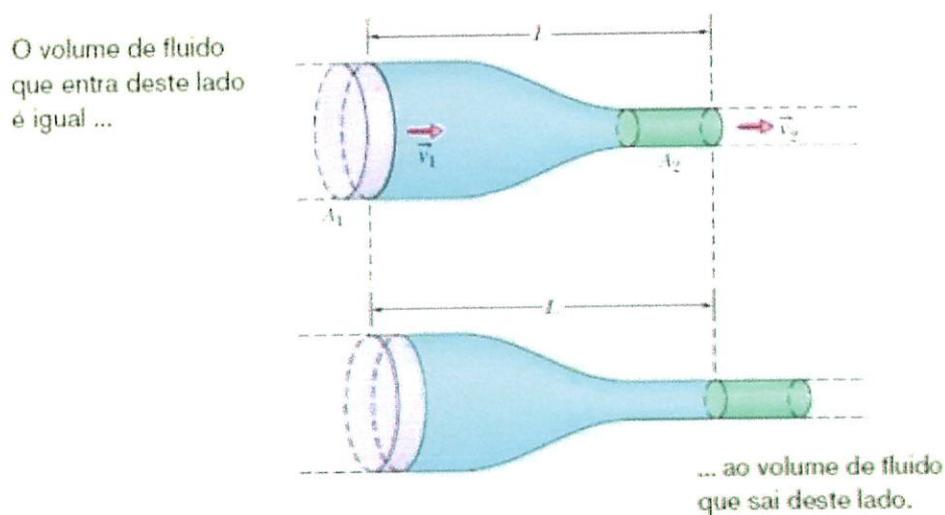
$F_j$  = fluxo externo que entra ou sai do conduto pelo nó que interliga os trechos  $j$ ,

$i = 1, 2, \dots, n$ ; com  $n \in \mathbb{Z}$

$j = 1, 2, \dots, m$ ; com  $m \in \mathbb{Z}$ .

No regime permanente, considerando o escoamento de um fluido por um tubo de corrente, onde não possa haver fluxo lateral de massa, a vazão em massa numa seção de entrada deverá ser a mesma na saída; pois não haverá variação das características, em nenhum ponto do fluido, com o tempo (BRUNETTI, 2008) como pode ser verificado na Figura 6.

**Figura 6** – Conservação da massa em um escoamento incompressível não viscoso.



Fonte: Halliday e Resnick (2016)

Dessa forma, a equação de continuidade para um fluido qualquer em regime permanente pode ser definida a seguir:

$$Q_{m1} = Q_{m2} \quad (5)$$

Sendo que:

$$Q_{m1} = \text{vazão em massa da entrada}$$

$$Q_{m2} = \text{vazão em massa da saída}$$

A equação (5) pode ainda ser reescrita das seguintes formas:

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (5.1)$$

Em que:

$\rho_1$  = densidade do fluido na entrada

$Q_1$  = vazão volumétrica de entrada;

$\rho_2$  = densidade do fluido na saída

$Q_2$  = vazão volumétrica da saída.

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

(5.2)

Em que:

$\rho$  = massa específica do fluido

$A$  = área da seção de escoamento

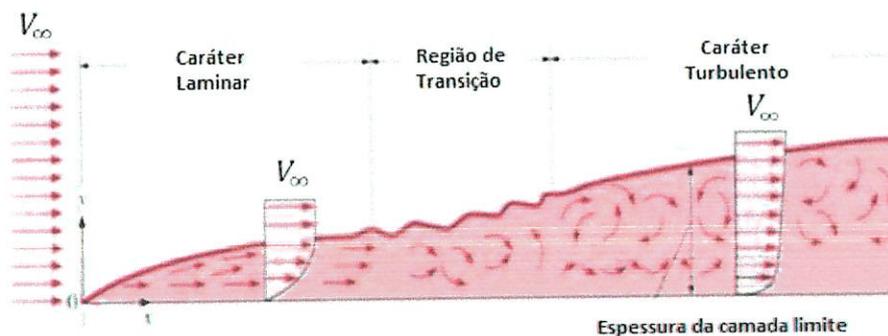
$v$  = velocidade do escoamento

### 2.3.6. Número de Reynolds

O número de Reynolds é muito utilizado em projetos hidráulicos e está relacionado ao regime de um fluido.

Conforme Cengel e Cimbala (2012), a passagem de um escoamento laminar para um turbulento depende não só da velocidade de escoamento, como também da geometria, da rugosidade da superfície, da temperatura da superfície, dentre outros fatores. A representação gráfica entre o limite de um escoamento laminar e turbulento pode ser analisada na Figura 7.

Figura 7 – Representação do limite entre escoamento laminar e turbulento



Fonte: Aerodinamica F1 < <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/10/que-es-el-numero-de-reynolds/>, acesso em 04-06-23 >

### 2.3.7. Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli é uma equação fundamental na mecânica dos fluidos que descreve a relação entre a pressão, velocidade e altura de um fluido em um sistema. A equação foi desenvolvida pelo físico suíço Daniel Bernoulli em 1738 e é amplamente aplicada na engenharia, em áreas como hidráulica, aeronáutica e engenharia mecânica.

De acordo com Brunetti (2008), a equação de Bernoulli relaciona a pressão estática, a pressão dinâmica e a energia potencial do fluido em um sistema, é escrita como:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (6)$$

Onde:

$P$  = pressão estática,

$v$  = velocidade do fluido,

$\rho$  = densidade do fluido,

$h$  = altura do fluido acima de um ponto de referência

$g$  = aceleração da gravidade

constante = a mesma ao longo de uma linha de corrente.

Segundo Munson (2004), embora a equação de Bernoulli, seja uma das mais antigas e utilizadas, detém de diversas condições para que seus resultados sejam conciliáveis com a realidade obtida e que não haja erros nas análises de escoamento feitas.

Por isso, as seguintes condições devem ser consideradas como: não deve haver bomba ou turbina no trecho a ser analisado, nem trocas de calor, o fluido deve se incompressível e ideal e com seções de propriedades uniformes (BRUNETTI, 2008).

A equação é uma consequência da conservação da energia em um fluido incompressível em regime de escoamento laminar. De acordo com Osterman e Brauner (2013), a equação de Bernoulli tem sido amplamente aplicada na engenharia para análise de sistemas hidráulicos, como como tubulações e bombas, e também em sistemas aerodinâmicos, como asas de avião.

Já para Balaras e Koumoutsakos (2012), a equação de Bernoulli possui suas limitações, sendo válida para fluidos incompressíveis e em regime de escoamento laminar, o que a torna inválida para fluidos em alta velocidade e turbulência. Apesar de suas limitações, a equação de Bernoulli continua sendo um importante ponto de partida para a análise de sistemas hidráulicos, aerodinâmicos e outros sistemas que envolvem fluidos. É uma ferramenta fundamental na mecânica dos fluidos e na engenharia em geral.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1. Descrição dos materiais

O sistema sugerido se baseia num modelo de conceito funcional que utiliza a energia potencial gravitacional em conjunto com a energia solar fotovoltaica (sistema de cogeração de energia) ao invés da energia elétrica convencional.

Basicamente, durante o dia, através do uso da energia solar, uma bomba elevará a água do reservatório inferior para um superior que, por intermédio da energia potencial gravitacional, fornecerá energia elétrica para um sistema supervisorio de resfriamento.

Com abastecimento de energia elétrica intermitente, tanto durante o dia, como durante a noite, o sistema funcionará pelo período de 24 horas, não correndo o risco de ser desativado por conta de uma possível falta ou falha de energia elétrica.

Para estudar a viabilidade e eficiência deste sistema, para fins de dimensionamento será adotado nesse trabalho um modelo de conceito funcional, assim como os estudos e resultados obtidos para um possível protótipo desenvolvido em menor escala.

O modelo apresentado se limitará a avaliar:

- A conversão entre tipos de energias (solar fotovoltaica em potencial gravitacional) para posterior uso como energia elétrica.
- Efetuar comparativo com a utilização de baterias para a mesma finalidade.

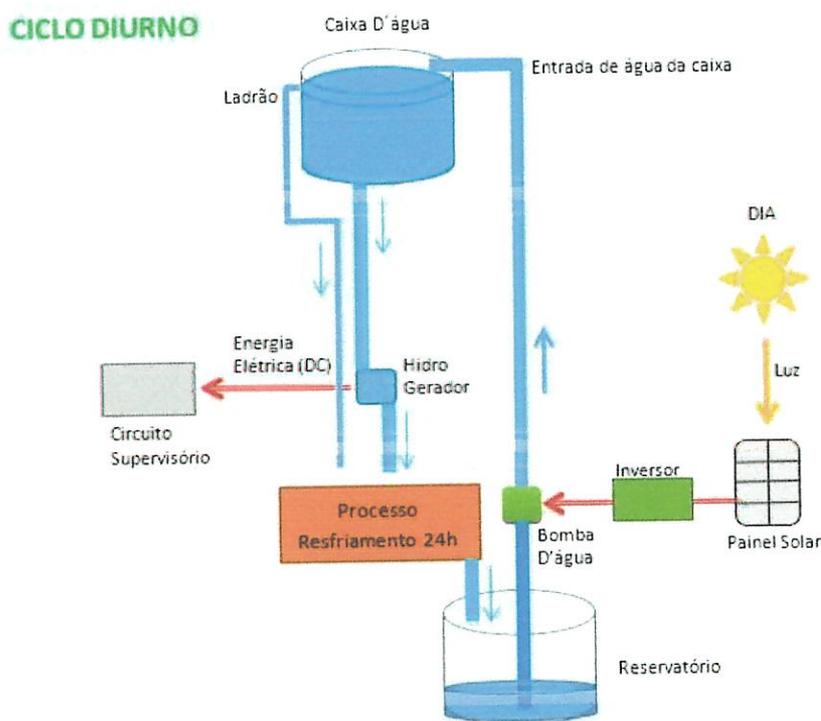
O funcionamento do sistema idealizado, operando tanto nos períodos de Sol, considerado com o ciclo diurno, como nos períodos sem Sol, aqui identificado como o ciclo noturno, seria:

### 3.1.1.1. Ciclo diurno (das 10:00h às 16:00h)

Durante o dia, o fornecimento de energia é através do painel solar, que faz a captação de energia solar e a transforma em energia elétrica, que possibilita o funcionamento da bomba d'água; que elevará a água do reservatório inferior para a caixa d'água (reservatório superior).

A água da caixa d'água será responsável pelo acionamento do hidrogerador (que ficará acionado 24 horas/dia). Se a caixa d'água estiver cheia, a água excedente será expelida pelo ladrão evitando dessa forma o transbordo. A água que passa pelo hidrogerador é usada para resfriamento de um processo (que ficará ligado 24 horas/dia). Já a energia produzida por ele, será aproveitada para um sistema supervisorio de monitoramento de temperatura e acionamento de alarme de falha (se necessário). A Figura 8 representa um esquema de funcionamento no ciclo diurno.

Figura 8 – Ciclo diurno do projeto



Fonte: Autoria própria

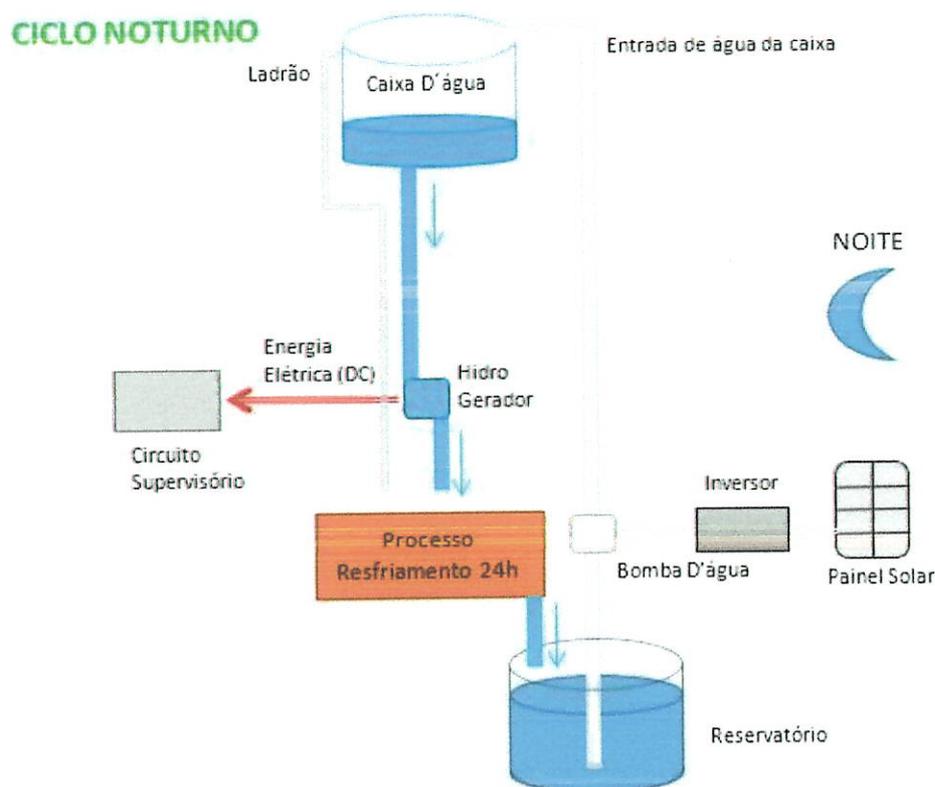
### 3.1.1.2. Ciclo noturno (16:00h às 10:00h do dia seguinte)

Nesse período, estimando-se que a incidência de luz solar no painel seja praticamente mínima ou nula, o painel solar não fornecerá energia elétrica para ativar a bomba d'água. Nesse caso, é estimado que na caixa d'água tenha uma reserva de água remanescente e suficiente para

passar pelo hidrogerador e, além de servir para resfriamento do processo, também gerar energia para o sistema supervisor de monitoramento.

O esquema de funcionamento no ciclo noturno está representado na Figura 9.

**Figura 9 – Ciclo noturno do projeto**



Fonte: Autoria própria

### 3.1.1.3. Materiais sugeridos

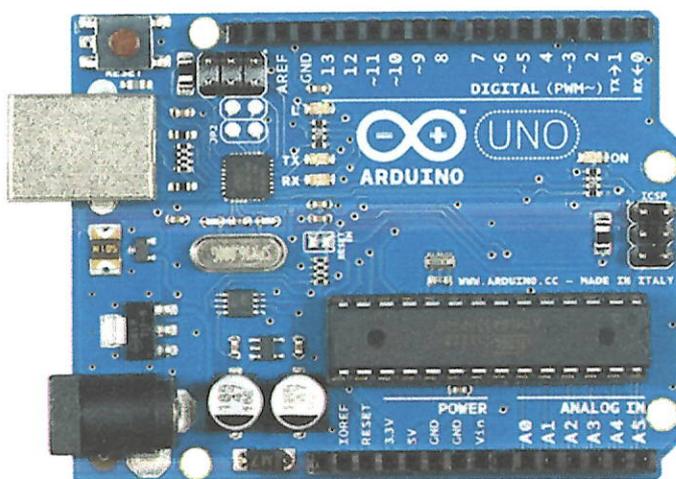
Para compor o projeto foram selecionados os seguintes materiais de acordo com as suas funcionalidades:

- **Painel solar** - O painel ou placa solar é responsável pela captação da energia solar e sua transformação em energia elétrica, através da conversão em células fotovoltaicas, fornecendo energia durante o dia.

- **Inversor** - O inversor tem a função de transformar a corrente contínua (DC) vinda das células fotovoltaicas em corrente alternada (AC) em 60 Hz e na tensão própria a ser utilizada (127 ou 220 Volts).
- **Reservatório** - O reservatório tem por finalidade armazenar a água de reuso do processo, e garantir o seu resfriamento por perda de calor ambiente. Uma observação importante, é que a água deve ser retirada do reservatório sempre em seu ponto mais fundo, pois é onde a água se encontra mais fresca (por processo físico de convecção térmica do líquido).
- **Bomba elétrica** - A bomba d'água elétrica tem a finalidade no projeto de elevar a água fresca do reservatório para a caixa d'água, e manter ainda cheia a caixa d'água durante todo o dia.
- **Caixa d'água** - A água da caixa será utilizada para diversas finalidades, dentre as quais:
  - Manutenção de vazão constante de água fresca no sistema de resfriamento do processo (ou seja, a remoção de energia térmica do sistema) ao longo do dia
  - Armazenamento de energia potencial gravitacional
  - Fornecimento de água fresca durante a noite e períodos sem sol
  - Auxílio no processo de fornecimento de energia, quando as placas solares estiverem com baixa eficiência.
- **Ladrão da caixa d'água** - O ladrão tem um importante função no sistema, sendo responsável por devolver a água fresca em excesso na caixa para o reservatório durante o funcionamento da bomba, ajudando a aerar e movimentar a água do reservatório, contribuindo assim com o refrescamento e oxigenação da água durante o período o dia. Durante a noite, embora o ladrão não esteja ativo, a temperatura do tempo costuma ser mais fria que o dia, contribuindo para refrescar o reservatório.

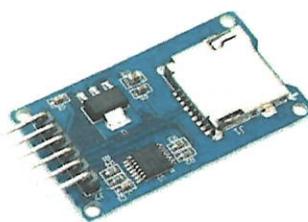
- **Hidrogerador** - A água armazenada na caixa permite o funcionamento do hidrogerador nos momentos em que a placa solar não estiver operando, fornecendo assim energia elétrica ao sistema de monitoramento.
- **Sistema supervisorio** - A função do sistema supervisorio é de realizar o monitoramento do resfriamento do processo, fazendo o registro de temperaturas ao longo do dia e gerando algum tipo de alarme ou mesmo desligando o processo, caso a temperatura fique fora do especificado. Para tanto, espera-se utilizar uma placa de hardware modelo Arduino UNO, conectada a um Shield (placa acessória) de SDCard e ligados a um mini buzzer (ou mini alto-falante) para fins de alarme, conforme apresentado nas Figura 10, Figura 11 e Figura 12 respectivamente.

**Figura 10** – Placa Eletrônica do Arduino Uno.



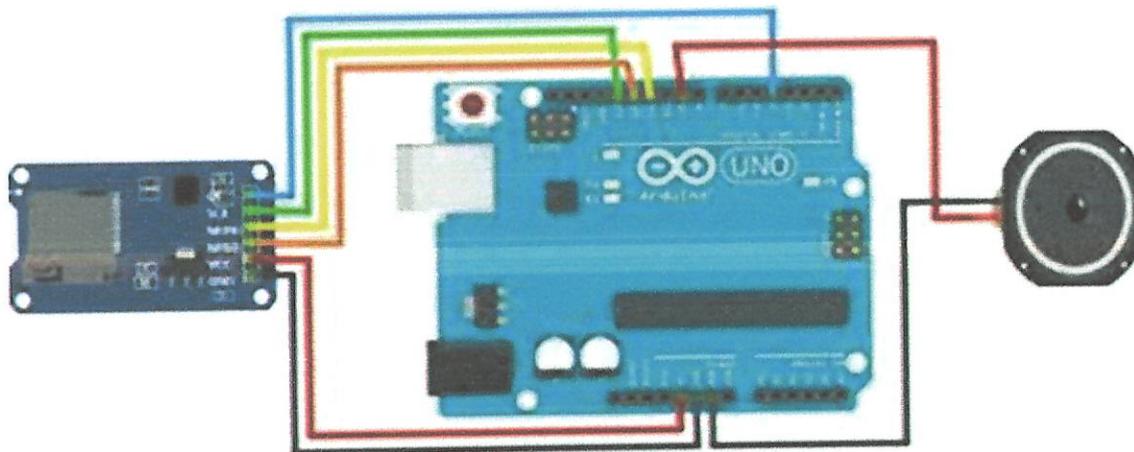
Fonte: Arduino Portugal (<https://www.arduinoportugal.pt/o-que-e-arduino/>, acesso em 28 de maio de 2023)

**Figura 11** – Placa Shield SD-card para uso com a placa Arduino.



Fonte: Master Walker (<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-modulo-leitor-de-micro-sd-card>, acesso em 28 de maio de 2023)

**Figura 12** – Esquema de montagem do circuito supervisor proposto.



Fonte: autoria própria

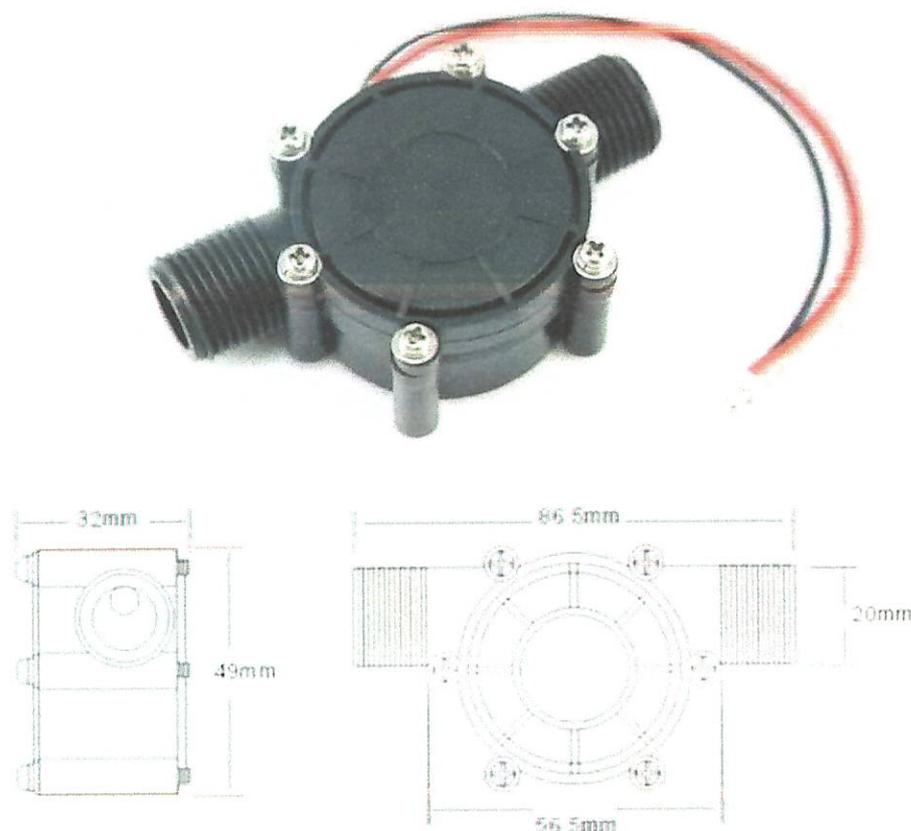
## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1. Dimensionamento do sistema proposto

Optou-se por iniciar o dimensionamento pela parte mais crítica, que é a escolha da microturbina, cuja função será operar como gerador hidroelétrico e alimentar o circuito supervisor. Após uma busca no mercado local, escolheu-se a microturbina modelo F50-12V de marca OEM, pois além de ser uma peça de baixo custo, é facilmente encontrada e tem sido utilizada por inúmeros projetos e até em trabalhos acadêmicos.

O Mini Gerador Hidrelétrico F50 é uma pequena turbina capaz de converter fluxo de água em energia elétrica, com saída de 12V DC (corrente contínua). Para facilitar a instalação, possui conexão de rosca 19 mm e 13 mm de diâmetro interno, suporta pressão máxima de até 1.2 MPa, capaz de gerar corrente máxima de 220 mA, conforme apresentado na Figura 14 e na Tabela 1.

**Figura 14** – Mini Gerador Hidrelétrico modelo F50-12V.



Fonte: ALIEXPRESS (<https://pt.aliexpress.com/item/1005003590833041.html>, acesso em 05 de outubro de 2022)

**Tabela 1** – Especificações técnicas da microturbina.

<p>Mini Gerador Hidrelétrico F-50 12V DC 10W          Modelo: F50          Marca: OEM          Rosca: 19mm          Diâmetro de Vazão: 1/2" = 12.2 mm          Pressão máxima de Trabalho: 1.2 MPa          Pressão de trabalho: 0 ~ 1.0 MPa          Pressão de teste: 0.6MPa          Temperatura de Operação: 0 ~ 80°C          Temperatura máxima de Operação: 100°C          Faixa de fluxo: 2.5 ~ 25L / min (Pressão 0.05 ~ 0.2MPa)          Tensão de saída: DC 12V taxa de fluxo de água: 4L / min          Corrente de Saída: Max 220mA          Potência: 10W          Material: Termoplástico / Metal          Tamanho: 58mm Largura x 24mm Profundidade x 24mm Altura          Peso: 90g</p>
--

Fonte: ALIEXPRESS (<https://pt.aliexpress.com/item/1005003590833041.html>, acesso em 20 de outubro de 2022)

Como deseja-se alimentar um sistema provisório baseado num microcontrolador com corrente máxima de 220 mA, o modelo de microturbina escolhido seria mais do que suficiente para esta tarefa. Para a placa de Arduino, optou-se pelo modelo Uno pela facilidade de programação e adequação a funcionalidade como sistema supervisor, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2** – Comparativo entre os modelos de placas Arduino

<b>Placa</b>	<b>Corrente</b>
Uno (5V USB)	47 mA
Uno (fonte de alimentação de 9V)	48 mA
Uno (5V, processador removido)	32 mA
Uno (9V, processador removido)	40 mA
Leonardo (5V USB)	42 mA
Due (5V USB)	160 mA
Due (fonte de alimentação de 9V)	70 mA
Mini Pro (fonte de alimentação de 9V)	42 mA
Mini Pro (5V USB)	22 mA
Mini Pro (3,3V direto)	8 mA

Fonte: Blog Arduino Prog (<http://arduinoprog.blogspot.com/2015/09/como-economizar-o-consumo-de-energia-do.html>, acesso em 20 de outubro de 2022)

Para fins de dimensionamento, será estimado o consumo do sistema supervisor ( $I_{SS}$ ) como sendo de 100 mA de consumo de corrente (alimentado com tensão  $V_{SS}$  de 12V DC), ou seja, 1,2 Watts de potência ( $P_{SS}$ ), cerca do dobro do consumo da placa do Arduino UNO.

$$I_{SS} = 100\text{mA} \quad (7)$$

$$V_{SS} = 12V_{DC} \quad (8)$$

$$P_{SS} = 1,2\text{W} \quad (9)$$

Considerando a margem de erro de 10%, optou-se pela geração de 1,351 Watts (realçada na cor amarela), que corresponde a uma corrente gerada de 112,64 mA na tensão de 12,00 Volts, conforme dados da Tabela 3.

Os parâmetros DV (desvio padrão) e CV (coeficiente variação) tanto da tensão, quanto da corrente são bem reduzidos (0,256% para a tensão e 1,97% para a corrente) para a faixa escolhida, indicando estabilidade.

Os valores para a geração da energia elétrica da microturbina, podem ser verificados conforme a Tabela 3.

**Tabela 3 – Geração de energia elétrica de uma microturbina**

PRESSÃO mca	VAZÃO m <sup>3</sup> /s	TENSÃO V	DV	CV	CORRENTE A	DV	CV	POTÊNCIA W
0,50	0,00E+00	0,00	0,0000	0,0000	0,00000	0,00000	0,0000	0,000
1,50	4,83E-05	4,66	0,0725	1,5564	0,00775	0,00050	6,4739	0,036
2,50	6,67E-05	8,37	0,0885	1,0583	0,02177	0,00008	0,3562	0,182
3,50	8,33E-05	11,10	0,1280	1,1537	0,03303	0,00016	0,4992	0,367
4,50	1,02E-04	11,66	0,0392	0,3363	0,04679	0,00015	0,3184	0,546
5,50	1,12E-04	11,71	0,0202	0,1725	0,05526	0,00026	0,4663	0,647
6,50	1,27E-04	11,78	0,0474	0,4021	0,06405	0,00017	0,2660	0,754
7,50	1,37E-04	11,89	0,0477	0,4009	0,08202	0,00008	0,1024	0,975
8,50	1,45E-04	11,87	0,0500	0,4216	0,09056	0,00015	0,1631	1,075
9,50	1,55E-04	11,80	1,5087	12,7895	0,09727	0,00017	0,1760	1,147
10,50	1,60E-04	11,98	0,0443	0,3702	0,10518	0,00035	0,3370	1,260
11,50	1,67E-04	12,00	0,0307	0,2560	0,11264	0,00222	1,9738	1,351
12,50	1,73E-04	12,18	0,7526	6,1782	0,11845	0,00060	0,5060	1,443
13,50	1,83E-04	12,07	0,0274	0,2273	0,12258	0,00019	0,1536	1,479
14,50	1,88E-04	12,10	0,0317	0,2618	0,12659	0,00046	0,3600	1,532
15,50	1,92E-04	12,09	0,0280	0,2400	0,13218	0,00057	4,3300	1,600

Fonte: Avaliação da geração de energia elétrica de uma microturbina instalada em tubulações de água em sistemas agroindustriais, TORRES, W., Dissertação de Mestrado, página 44

Da Tabela 3, tem-se que para tal geração, será necessária uma pressão de 11,50 mca (metros de coluna d'água), ou seja, a caixa d'água deverá estar posicionada numa altura ( $H_{CD}$ ) de 11,50 m em relação à microturbina, que é uma elevação considerável, e deverá ser levada em consideração para a escolha da bomba de água.

$$H_{CD} = \boxed{11,5\text{m}} \quad (10)$$

Outra medida importante é a vazão da saída da microturbina ( $V_{MT}$ ), que é de  $1,67 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  (que fornece aproximadamente 10 Litros por minuto ou 600 Litros por hora).

$$V_{MT} = 1,67 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 10 \text{ L}/\text{min} = 600 \text{ L}/\text{h} \quad (11)$$

### 3.2.2. Vazão da bomba

A caixa d'água deverá fornecer água suficiente para operação mínima de 24 horas por dia (em dias ensolarados). Uma bomba deverá encher a caixa d'água no período de sol (que energizará a placa foto voltaica).

Para fins de cálculo, considerou-se como período de irradiação solar válido e suficiente, apenas o período que o sol é mais forte, compreendido entre 10:00h e 16:00h (6 horas por dia). Durante esse período, a bomba deverá encher a caixa d'água enquanto o sistema utiliza a água para resfriamento do processo e ainda gera energia para o sistema supervisor. Nas demais 18 horas, apenas a água remanescente da caixa d'água será utilizada.

A capacidade de volume da caixa d'água ( $C_X$ ), dada em litros, e a vazão calculada da bomba ( $V_B$ ), dada em litros por hora, será dada por:

$$(V_B - V_{MT}) \times 6\text{h} = V_{MT} \times 18\text{h} \quad (12)$$

$$(V_B - V_{MT}) \times 6\text{h} = V_{MT} \times 18\text{h}$$

$$V_B \times 6\text{h} = V_{MT} \times 24\text{h}$$

$$V_B \times 6\text{h} = 600 \text{ L}/\text{h} \times 24\text{h}$$

$$V_B \times 6\text{h} = 14.400\text{L}$$

$$V_B = 2.400\text{L}/\text{h}$$

### 3.2.3. Volume da caixa d'água

A capacidade de volume da caixa d'água ( $C_X$ ) é dada pelo volume de água será dada por:

$$C_X = (V_B - V_{MT}) \times 6h \quad (13)$$

$$C_X = (2.400 - 600) \times 6$$

$$C_X = 10.800 \text{ Litros}$$

### 3.2.4. Bomba d'água

De acordo com os cálculos da vazão e da altura da caixa d'água, o próximo passo é escolher a bomba d'água a ser utilizada. Optou-se por esse modelo BA-40 da marca Ferrari (Figura 15), conforme consta na Tabela 4 com referências a bomba d'água periférica.

**Tabela 4** – Especificações da bomba periférica.

Marca: Ferrari
modelo: BA-40
Motor: 1/2 cv (370 Watts)
Tensão Nominal: Bivolt (127/220V)
Rotação: 3500 rpm
Vazão máxima (Q): 2400 L / hora
Altura manométrica máxima (Hm): 30 mca
Sucção máxima (Hs): 8 mca
Recalque / Sucção (pol): 1" rosca (BSP)
Dimensões
A: 29cm
L: 17cm
P: 16cm
Peso: 6kg

Fonte: Dados do fabricante (<https://ferrarinet.com.br/>, acesso em 05 de outubro de 2022)

Conforme especificado na Tabela 4, a altura manométrica máxima (Hm) da bomba é de 30 mca (metros de coluna de água), que atende com folga a altura necessária para o projeto em questão, e entrega exatamente a vazão necessária de 2400 L/h.

**Figura 15** – Bomba d'água periférica escolhida



Fonte: Dados do fabricante (<https://ferrarinet.com.br/>, acesso em 05 de outubro de 2022)

#### **3.2.4. Escolha do painel solar e inversor**

Para a escolha do painel solar, deve-se atentar a potência da bomba d'água que será alimentada por ele. Por esse motivo, é mister que o painel solar forneça durante o período de sol, pelo menos, a potência de 370 Watts que corresponde a potência necessária para acionar o motor da bomba.

Como a bomba se trata de um motor AC, se faz necessário que a corrente nominal da saída do inversor seja maior que a potência do motor, visto que, no momento de partida do motor, a corrente de pico, sendo muito maior que a corrente nominal, poderá danificar espontaneamente o inversor.

Nesse caso, é mandatório o uso de proteção adicional ao circuito do inversor, contudo, somente em campo seria possível tal observação.

Para fins de dimensionamento, escolheu-se um equipamento micro inversor de 700 W, que pode ser ligado em até duas placas solares de 440W cada (Figura 16 e Tabela 5).

**Figura 16** – Micro Inversor Solar Hoymiles Mi-700lv 700W.



Fonte: HOYMILES (<https://www.hoymiles.com/>, acesso em 05 de outubro de 2022)

**Tabela 5** – Especificações do inversor escolhido.

Marca: hoymiles
Modelo: MI-700
Entrada para 2 módulos fotovoltaicos;
Máxima potência por módulo fotovoltaico: 440W;
Potência nominal de saída: 700W;
Eficiência: 95%;
Tensão nominal de saída: 127V
Frequência nominal: 60Hz;
Corrente nominal de saída: 5,51 A.

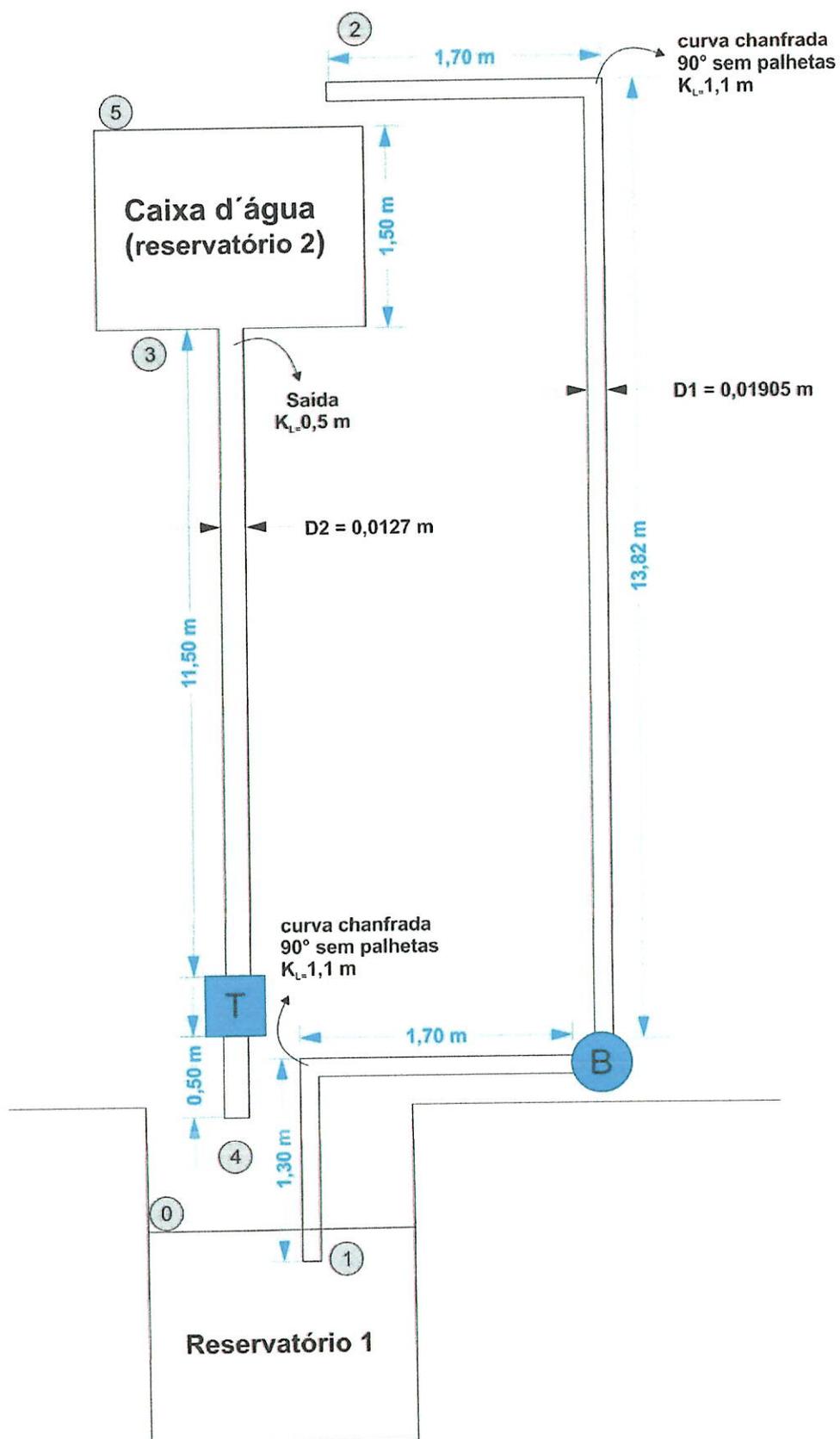
Fonte: HOYMILES (<https://www.hoymiles.com/>, acesso em 05 de outubro de 2022)

### 3.2.5. Calculando as perdas no sistema

Para uma estimativa mais próxima da realidade, embora seja um modelo de conceito funcional, serão consideradas e calculadas possíveis perdas no sistema.

A Figura 17 mostra como ficará o sistema proposto redesenhado.

Figura 17 – Modelo do sistema proposto



Fonte: Autoria própria

Foram consideradas as seguintes informações para fins de cálculos:

Fluído é água e incompressível

Regime permanente

$$\mu = 1.10^{-3} \text{ Kg/ m. s}$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = \text{aceleração da gravidade} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$Q_T = \text{vazão da turbina} = 1,67.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\eta_T = \text{Eficiência da turbina} = 82\%$$

$$N_{eT} = \text{Potência nominal da turbina} = 10 \text{ W}$$

$$Q_B = \text{vazão da bomba d'água} = 6,67.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\eta_B = \text{Eficiência da bomba} = 85\%$$

$$N_{eB} = \text{Potência nominal da bomba d'água} = 340 \text{ W}$$

$$D1 = \text{diâmetro do tubo do trajeto do ponto 1 para 2} = 0,01905 \text{ m}$$

$$D2 = \text{diâmetro do tubo do trajeto do ponto 3 para 4} = 0,0127 \text{ m}$$

Tubos de PVC liso

### 3.2.5.1. Cálculo das perdas no trecho 1 ao 2 com a bomba.

- a) Calculou-se a área da seção transversal do tubo utilizando a equação matemática de área para circunferência:

$$A_1 = \frac{\pi (D1)^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,01905)^2}{4} = \boxed{0,002850 \text{ m}^2} \quad (14)$$

- b) Calculou-se a velocidade no duto ( $V_1$ ), conforme demonstrado na Equação 15, sendo:

$Q_B$  = vazão volumétrica

$V_1$  = velocidade

$A_1$  = área da seção transversal

$$Q_B = V_1 \cdot A_1 \quad (15)$$

$$6,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = V_1 \cdot 0,002850 \text{ m}^2$$

$$V_1 = \frac{6,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{2,85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = \boxed{2,34 \text{ m/s}}$$

- c) Calculou-se o caráter do escoamento do trecho utilizando a equação de Reynolds, conforme a Equação 16:

$$Re_1 = \frac{\rho \cdot V_1 \cdot D_1}{\mu} \quad (16)$$

$$Re_1 = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,34 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,001905 \text{ m}}{1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{ms}}} = \boxed{44577}$$

- d) Calculou-se o fator de atrito através da Equação de Haaland, de acordo com a Equação 19. Considerando que o resultado  $Re_1$  é maior que 4000; o caráter de escoamento é classificado como turbulento. Na ocasião, o material do tubo é PVC liso, a rugosidade adotada será de 0m.

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -1,8 \cdot \log \left[ \left( \frac{e}{3,7 D_1} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re_1} \right] \quad (17)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -1,8 \cdot \log \left[ \left( \frac{0/D_1}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{44577} \right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = 6,85847$$

$$\sqrt{f_1} = \frac{1}{6,85847}$$

$$f_1 = \left( \frac{1}{6,85847} \right)^2 = \boxed{0,02126}$$

e) Calculou-se os coeficientes de perdas do trecho como mostra a Equação 18:

$$\Sigma K_{L_{1,2}} (\text{coeficientes de perdas}) = 2 \cdot (1,1) = \boxed{2,2 \text{ m}} \quad (18)$$

f) Calculou-se os coeficientes das perdas menores foram calculadas seguindo a Equação 19:

$$\Sigma H_{L_{1,2}} (\text{perdas menores}) = \Sigma K_{L_{1,2}} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (19)$$

$$\Sigma H_{L_{1,2}} (\text{perdas menores}) = \frac{2,2 \cdot (2,34)^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{12,04632}{19,62} =$$

$$\Sigma H_{L_{1,2}} (\text{perdas menores}) = \boxed{0,6140 \text{ m}}$$

g) Calculou-se o comprimento total do tubo ( $L_{1,2}$ ):

$$L_{1,2} = 1,30 \text{ m} + 1,70 \text{ m} + 13,82 \text{ m} + 1,70 \text{ m} = \boxed{18,52 \text{ m}} \quad (20)$$

h) Calculou-se a perda de carga no comprimento do duto ( $H_{p_1}$ ) sendo:

$$H_{p_{1,2}} = f \cdot \frac{L_{1,2}}{D_1} \cdot \frac{v_1}{2g} \quad (21)$$

$$H_{p_{1,2}} = 0,02126 \cdot \frac{18,52 \text{ m}}{0,01905 \text{ m}} \cdot \frac{\left(2,34 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_{p_{1,2}} = \frac{2,1559}{0,373761} \text{ m} = \boxed{6,77 \text{ m}}$$

i) Calculou-se a perda total no trajeto do ponto 1 para 2:

$$H_{p_{1,2}} + \Sigma H_{L_{1,2}} = 6,77 \text{ m} + 0,6140 \text{ m} \quad (22)$$

$$H_{p_{1,2}} + \Sigma H_{L_{1,2}} = 7,384 \text{ m} = \boxed{7,38 \text{ m}}$$

j) Calculou-se a potência que a máquina troca com o fluido ( $N_{MB}$ ):

$$N_{MB} = N_{eB} \cdot \eta_B \quad (23)$$

$$N_{MB} = 340 \cdot 0,85 = \boxed{289 \text{ W}}$$

j) Calculou-se a potência dissipada por atritos nos dutos ( $N_{diss_{1,2}}$ ):

$$N_{diss_{1,2}} = \rho \cdot g \cdot (H_{p_{1,2}} + \Sigma H_{L_{1,2}}) \quad (24)$$

$$N_{diss_{1,2}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot 7,38 = \boxed{12,09 \text{ W}}$$

k) Calculou-se a carga no ponto 0 (zero):

$$H_0 = z_0 + \alpha \cdot \frac{v_0^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho g} = 0 + 0 + 0 = \boxed{0 \text{ m}} \quad (25)$$

l) Calculou-se a carga no ponto 2:

$$H_2 = z_2 + \alpha \cdot \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \quad (26)$$

$$H_2 = (1,30 + 13,82) + 1,05 \cdot \frac{(2,34)^2}{2 \cdot 9,81} = 15,12 + 0,2930$$

$$H_2 = \boxed{15,41 \text{ m}}$$

l) Calculou-se o balanço de energia no trecho de 1 para 2:

$$H_0 + H_B = H_2 + (Hp_{1,2} + \Sigma H_{L_{1,2}}) \quad (27)$$

$$0 + H_B = 15,41 + 7,38$$

$$H_B = \boxed{22,79 \text{ m}}$$

m) Calculou-se a potência da bomba:

$$N_B = \frac{\gamma \cdot Q_B \cdot H_B}{\eta_B} \quad (28)$$

$$N_T = \frac{10^4 \cdot 6,67 \cdot 22,79}{0,85} = \boxed{178,83 \text{ W}}$$

### 3.2.5.2. Cálculo das perdas no trecho 3 ao 4 com a turbina.

a) Calculou-se a área da seção transversal do tubo utilizando a equação matemática de área para circunferência:

$$A_2 = \frac{\pi(D_2)^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0127)^2}{4} = \boxed{0,0001267 \text{ m}^2} \quad (29)$$

b) Calculou-se a velocidade no duto ( $V_2$ ), conforme a equação  $Q = V \cdot A$ , sendo:

$Q$  = vazão volumétrica

$V$  = velocidade

$A$  = área da seção transversal

$$Q_T = V_2 \cdot A_2 \quad (30)$$

$$1,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = V_2 \cdot 0,0001267 \text{ m}^2$$

$$V_2 = \frac{1,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{1,267 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = \boxed{1,32 \text{ m/s}}$$

- c) Calculou-se o caráter do escoamento do trecho utilizando a equação de Reynolds, sendo

$$Re_2 = \frac{\rho \cdot V_2 \cdot D_2}{\mu} = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,32 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0127 \text{ m}}{1 \cdot \frac{10^{-3} \text{Kg}}{\text{ms}}} = \boxed{16764} \quad (31)$$

- d) Calculou-se o fator de atrito através da Equação de Haaland. Considerando que o resultado  $Re_1$  é maior que 4000; o caráter de escoamento é classificado como turbulento. Na ocasião, o material do tubo é PVC liso, a rugosidade adotada será de 0m

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = -1,8 \cdot \log \left[ \left( \frac{e}{D_1} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re_2} \right] \quad (32)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = -1,8 \cdot \log \left[ \left( \frac{0/D_1}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{16764} \right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = 6,09395$$

$$\sqrt{f_2} = \frac{1}{6,09395}$$

$$f_2 = \left( \frac{1}{6,09395} \right)^2 = \boxed{0,02693}$$

e) Calculou-se os coeficientes de perdas:

$$\Sigma K_{L_{3,4}} (\text{coeficientes de perdas}) = 1 \cdot (0,5) = \boxed{0,5 \text{ m}} \quad (33)$$

f) Calculou-se os coeficientes das perdas menores:

$$\Sigma H_{L_{3,4}} (\text{perdas menores}) = \Sigma K_{L_1} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (34)$$

$$\Sigma H_{L_{3,4}} (\text{perdas menores}) = \frac{0,5 \cdot (1,32)^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{0,8712}{19,62}$$

$$\Sigma H_{L_{3,4}} (\text{perdas menores}) = \boxed{0,0444 \text{ m}}$$

g) Calculou-se o comprimento total do tubo ( $L_{3,4}$ ):

$$L_{3,4} = 11,50 \text{ m} + 0,50 \text{ m} = \boxed{12,00 \text{ m}} \quad (35)$$

h) Calculou-se a perda de carga no comprimento do duto ( $H_{p_{3,4}}$ ) sendo:

$$H_{p_{3,4}} = f \cdot \frac{L_{3,4}}{D_2} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (36)$$

$$H_{p_{3,4}} = 0,02693 \cdot \frac{12,00 \text{ m}}{0,0127 \text{ m}} \cdot \frac{\left(1,32 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_{p_{3,4}} = \frac{0,5630739}{0,249174} \text{ m} = \boxed{2,26 \text{ m}}$$

i) Calculou-se a perda total no trajeto do ponto 3 para 4:

$$H_{p_{3,4}} + \Sigma H_{L_{3,4}} = 2,26 \text{ m} + 0,0444 \text{ m} \quad (37)$$

$$Hp_{3,4} + \Sigma H_{L_{3,4}} = 2,304 \text{ m} = \boxed{2,30 \text{ m}}$$

i) Calculou-se a potência que a máquina troca com o fluido ( $N_{MT}$ ):

$$N_{MT} = N_{eT} \cdot \eta_T = 10 \cdot 0,82 = \boxed{8,2 \text{ W}} \quad (38)$$

j) Calculou-se a potência dissipada por atritos nos dutos ( $N_{diss3,4}$ ):

$$N_{diss_{3,4}} = \rho \cdot g \cdot (Hp_{3,4} + \Sigma H_{L_{3,4}}) \quad (39)$$

$$N_{diss_{3,4}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 6,67 \cdot 10^{-4} \cdot 2,30 = \boxed{15,05 \text{ W}}$$

k) Calculou-se a carga no ponto 5, considerando que  $P_5$  será 0 Pa (man) pois o ponto está na superfície de um tanque aberto para a atmosfera e  $V_5$  será 0 porque o ponto está na superfície de um tanque em regime permanente:

$$H_5 = z_5 + \alpha \cdot \frac{V_5^2}{2g} + \frac{P_5}{\rho g} \quad (40)$$

$$H_5 = z_5 + 0 + 0 = 1,5 \text{ m} + 11,5 \text{ m} + 0,50 \text{ m} = \boxed{13,50 \text{ m}}$$

n) Calculou-se a carga no ponto 4, considerando que  $P_4$  será 0 Pa (man) pois nesse o ponto o jato encontra a atmosfera:

$$H_4 = z_4 + \alpha \cdot \frac{V_4^2}{2g} + \frac{P_4}{\rho g} \quad (41)$$

$$H_4 = 0 + 1,05 \cdot \frac{(1,32)^2}{2 \cdot 9,81} + 0 = \boxed{0,0932 \text{ m}}$$

o) Calculou-se o balanço de energia no trecho de 5 para 4:

$$H_5 + H_T = H_4 + (Hp_{3,4} + \Sigma H_{L_{3,4}}) \quad (42)$$

$$13,50 + H_T = 0,0932 + 2,30$$

$$H_T = 2,3932 - 13,50$$

$$H_T = \boxed{-11,11 \text{ m}}$$

p) Calculou-se a potência da turbina:

$$N_T = \frac{\gamma \cdot Q_T \cdot H_T}{\eta_T} \quad (43)$$

$$N_T = \frac{10^4 \cdot 1,67 \cdot (-11,11)}{0,82} = -22,6199 = \boxed{-22,62 \text{ W}}$$

### 3.2.6. Dimensionamento do custo sistema proposto

Uma vez que o sistema esteja dimensionado, com todos os materiais necessários descritos, a previsão do custo estimado deverá ser calculada.

Seguindo as recomendações e especificações do dimensionamento do sistema, o custo estimado aproximado, considerando todos os materiais propostos, é de R\$ 10.220,82 (Dez mil, duzentos e vinte reais e oitenta e dois centavos), conforme demonstrado na Tabela 6.

**Tabela 6** – Descrição do custo estimado do sistema sugerido

<b>Item</b>	<b>Modelo</b>	<b>Custo</b>
<b>Painel Solar</b>	<i>Painel Solar 450W</i>	R\$ 929,99
<b>Inversor</b>	<i>Micro Inversor Solar Haymiles Mi-700lv 700w</i>	R\$ 1.350,00
<b>Bomba elétrica</b>	<i>Bomba elétrica Ferrai BA-40</i>	R\$ 199,90
<b>Caixa d'água</b>	<i>Caixa d'Água 10000 - 15000</i>	R\$ 7.500,00
<b>Hidrogerador</b>	<i>Mini Gerador Hidrelétrico modelo F50-12V</i>	R\$ 142,49
<b>Sistema Provisório</b>	<i>Placa Eletrônica do Arduino Uno</i>	R\$ 86,80
	<i>Placa Shield SD-card</i>	R\$ 11,64
<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 10.220,82</b>

Fonte: Autoria própria

Para fins de cálculos adicionais, calculou-se também o custo de manutenção para o sistema projetado, baseando-se nos itens mais críticos como o hidrogerador e a bomba.

Considerando a vida útil em torno de 3000 ciclos, o custo sugestivo para a reposição da bomba e da turbina seria no valor aproximado de R\$ 350,00.

### **3.2.7. Comparativo com soluções existentes no mercado**

Após procura no mercado, identificou-se a comercialização de sistemas já prontos, denominados *off-grid*, com valores a partir de R\$ 14.890,00 e que ainda utilizam baterias de lítio.

Calculou-se também o custo de reposição para este sistema já pronto. Neste caso, os itens mais críticos são as baterias. Caso seja necessária a troca das baterias, o custo estimado será aproximadamente de R\$ 3.500,00

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o dimensionamento e cálculo das possíveis perdas de cargas no sistema, os valores das potências referentes à bomba e a turbina foram:

- Potência calculada da bomba:  $N_B = 178,83\text{ W}$
- Potência calculada da turbina:  $N_T = -22,60\text{ W}$  (como se trata de uma turbina, é esperado que o valor calculado apresente resultado negativo).
- Comparando as potências calculadas com a escolha inicial da turbina e bomba, tem-se que a potência calculada da bomba apresentou ( $N_B = 178,83\text{ W}$ ) um valor menor que a escolha inicial de  $340\text{ W}$ . Já para a turbina, a potência calculada ( $N_T = 22,60\text{ W}$ ) apresentou um valor maior que a escolha inicial de  $10\text{ W}$ .

Como relação aos resultados obtidos a respeito das potências das máquinas, mesmo com a diferença entre os valores, a divergência apresentada é benéfica; pois se trata apenas de um primeiro projeto. Entretanto, a escolha das máquinas foi correta.

Apesar disso, sabe-se que projetos, quando saem do planejado para a implementação de fato, costumam apresentar desempenho menor do que o projetado. Os dados obtidos servirão para a decisão de escolha definitiva das máquinas numa possível montagem experimental.

Em relação ao custo calculado, chegou-se a valor de R\$ 10.220,82. Comparando-o com os sistemas já prontos no mercado, com valores a partir de R\$ 14.890,00, verificou-se que o custo apresentado é 30% menor, sem falar que os existentes ainda utilizam baterias de lítio como fonte de alimentação para o sistema supervisor.

Supondo-se que, sejam necessárias manutenções do sistema proposto ou troca de peças, os itens mais susceptíveis seriam o hidrogerador e a bomba elétrica.

Considerando-se a vida útil em torno de 3000 ciclos, a reposição custaria na faixa de R\$350,00; ao passo que, no sistema comercializado no mercado, o custo seria na faixa de R\$3500,00 para a reposição principalmente das baterias de lítio. Dessa forma, comparando os custos de manutenção entre eles, o sistema proposto apresentará um custo dez vezes menor.

## 5 CONCLUSÃO

Conforme apresentado e analisado neste trabalho, o projeto proposto apresentou vantagens, tais como:

- Uso de fonte de energia renovável
- Não é contaminante ou poluente para o meio ambiente
- Não se faz uso de baterias de lítio
- Utiliza materiais que possuem percentual alto de reciclagem (aproximadamente 95%)
- Custo de investimento inicial do projeto 30% menor que soluções já parecidas no mercado.
- Custo de manutenção do projeto 10 vezes menor com soluções prontas

Sobre a redução do uso de energia elétrica convencional, o uso combinado de dois tipos de energia renováveis é eficaz para a redução do uso da energia elétrica e principalmente para promover um consumo consciente. Ao combinar diferentes fontes renováveis, é possível aproveitar as vantagens específicas de cada uma delas e criar um sistema mais eficiente e sustentável.

No caso do projeto proposto, a combinação da energia solar fotovoltaica com a energia potencial gravitacional foi complementar pois utilizando-as em conjunto, foi possível aproveitar a produção de energia em diferentes momentos, otimizando a geração e reduzindo a dependência de uma única fonte.

Essa diversificação de fontes de energia renovável também pode contribuir para a estabilidade do sistema elétrico. Com a intermitência natural de algumas fontes renováveis, ter uma combinação delas permite que a geração seja mais consistente ao longo do tempo. Além disso, essa abordagem pode reduzir a necessidade de recorrer a fontes de energia convencionais em momentos de baixa geração renovável.

É importante mencionar que a eficácia ao combinar energias renováveis para a redução do uso de energia elétrica depende de vários fatores, incluindo a infraestrutura e o dimensionamento adequados, a disponibilidade de recursos renováveis na região e a capacidade de integração das diferentes fontes. Além disso, políticas e incentivos governamentais podem desempenhar um papel fundamental na promoção e facilitação desse tipo de abordagem.

As energias renováveis podem oferecer uma opção mais econômica em comparação com as fontes convencionais. À medida que a tecnologia avança e os custos de instalação e produção de energia renovável diminuem, torna-se mais viável economicamente investir em fontes limpas, ocasionando a redução do consumo de energia elétrica convencional.

De forma geral, o trabalho apresentou resultados satisfatórios e atendeu às expectativas. Por se tratar de uma solução sustentável que não utiliza energia elétrica convencional, pode ser considerada como recurso alternativo para regiões onde há problemas com distribuição ou escassez de energia elétrica, por exemplo. Outro fator importante é o fato de propor o uso consciente dos recursos, com custo de investimento e de manutenção consideravelmente menores com soluções já existentes no mercado.

Como opções de melhorias ou recomendação para futuros trabalhos, o ideal seria a montagem do projeto em forma experimental para uma melhor análise e validação da eficácia do sistema; como já citado anteriormente, por exemplo, sobre a necessidade do uso de proteção adicional ao circuito do inversor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGD – Associação Brasileira de Geração Distribuída. **Geração Distribuída: conceitos e caminhos para o desenvolvimento sustentável**. São Paulo, Brasil, 2021. Disponível em: <<https://drudu6g9smo13.cloudfront.net/wp-content/uploads/2021/03/e-book-ABGD.pdf?x98884>>. Acesso em: 13/10/2022.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. 153p. Disponível em: <<https://livroaberto.ibict.br/handle/1/531>>. Acesso em 18-10-2022

ANEEL. **Energia solar**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\\_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 09 de junho de 2022.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2021. **Brasil alcança a marca histórica de 10 GW de capacidade instalada de energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/brasil-alcanca-a-marca-historica-de-10-gw-de-capacidade-instalada-de-energia-solar-fotovoltaica/>>. Acesso em 20/04/2023.

AZEVEDO, G.J.R. **Projeto e construção de uma bomba de pistões axiais tipo swashplate de vazão variável**. 2009, 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Guaratinguetá - SP, 2009.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9.ed. São Paulo: Blücher, 2015. 632p.

BALARAS, E. and KOUMOUTSAKOS, P. **High-Performance Computing in Fluid Dynamics: An Overview of Contemporary Approaches**. Journal of Fluids Engineering, 134(4), p. 041101, 2012.

BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2003.

Bortoloto, V. A., Souza, A. J., Gois, G., Martins, M. A., Berghe, M. J., & Montanha, G. K. VI JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica. 2017. **Geração de Energia Solar On Grid e Off Grid**. Disponível em: <<http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/VIJTC/VIJTC/paper/view/1069>>. Acesso em: 03/05/2023.

BRITO, M. A. G., *et al.* **Research on photovoltaics: review, trends and perspectives**. In: Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). p. 531-537, 2011.

BRITO, M. **Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade**. Revista O Instalador, 2006.

BRUNETTI, F., **Mecânica dos Fluidos**. 2º Edição, Pearson Prentice Hall, 2008.

Björn NYKVIST & Måns NILSSON. "**Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles**," Nature Climate Change, Nature, vol. 5(4), pages 329-332, April 2015.

CALGARO, Camila Ottonelli et al. **Recuperação de cobalto de baterias íon-lítio através de lixiviação ácida e eletro-obtenção**. Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET), v. 5, n. 5, p. 867-874, 2012.

CEMIG. **Alternativas Energéticas**. [S.l.], 2012. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/Alternativas%20Energeticas.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/Alternativas%20Energeticas.pdf)>. Acesso em 13/10/2022.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. Porto Alegre: AMGH Bookman, 2012.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Energia Solar – Princípios e Aplicações**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf)>. Acesso em: 13/10/2022.

CORTEZ, R. J. M., 2013. **Sistema De Seguimento Solar Em Produção De Energia Fotovoltaica**. Disponível em: <<https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/72632/1/000157958.pdf>>. Acesso em: 20/04/2023.

CRESESB - Centro De Referência Para Energia Solar E Eólica Sérgio De Salvo Brito. **Energia Solar: Princípios e Aplicações**. Tutorial Solar, 2006.

DELMÉE, G.J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003.

ENERGIA TOTAL, 2022. **Como funciona o painel solar fotovoltaico e do que é feito?** Disponível em <<https://www.energiatotal.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico-e-do-que-sao-feitos>>. Acesso em: 19/10/2022

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. GEPEA - Grupo de Energia Escola Politécnica, 2012.

FOX, R. W. **Introdução a Mecânica dos fluidos**. 7º Edição, Editora LTC, 2010.

GILES, R. V. **Mecânica dos fluídos e hidráulica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1974. 412 p.

GOUVEA, M.M.R. **Estudo de confiabilidade em bombas centrifugas**. Monografia (graduação) - Universidade São Francisco – USF, curso de Engenharia Mecânica. Campinas – SP, 2008.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 10. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. Abu Dhabi: IRENA, 2016. 100p. Disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf)>. Acesso em 28-05-2023.

KAPADIA, K. **Produção de energia renovável: a review of four Bank - GEF projects**. Banco Mundial. 2004.

LINDEN, D; REDDY, T. B. **Handbook of Batteries**. McGraw-Hill Third Edition. 2002

LINSINGEN, Irlan Von. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. 2. ed. FLORIANÓPOLIS: UFSC, 2003. 399 p.

LOPES, L. V. **Política energética e fontes alternativas no Brasil**. Revista Gestão e Conexões, 2015. p. 144-163

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Segunda Edição. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 782 p.

MARI JÚNIOR, Alvaro *et al.* **Vantagens e desvantagens da energia hidráulica**. Cascavel: Acta Iguazu, 2013. 9 p.

MATTOS, Edson Ezequiel de; FALCO, Reinaldo de. **Bombas Industriais**. Segunda Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

MELO, G.B. PET Química, 2022. **A química por trás dos painéis solares e o funcionamento de um sistema fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.petquimica.ufc.br/a-quimica-por-tras-dos-paineis-solares-e-o-funcionamento-de-um-sistema-fotovoltaico/>>. Acesso em: 19/10/2022.

MUNSON, Bruce R et al, **Fundamentos da mecânica de fluidos**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2004.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Lavras, Minas Gerais, Brasil 2004.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. v2.

OSTERMAN, M. and BRAUNER, N. The Bernoulli Equation and its Application. Engineering Review, 33(2), pp. 145-150, 2013.

PACHECO, Fabiana. **Energias Renováveis: Breves Conceitos**. Salvador: Conjuntura Econômica n. 149, 2006.

PAULA, H F; ALVES, E G; MATEUS, A L. **Quântica para iniciantes: investigações e projetos**. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2011

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. de.; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p.

PINHO, J. T., & Galdino, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, Brasil: Grupo de Trabalho de Energia Solar. 2014. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>. Acesso em: 20/08/2022.

ReciclaBR, 2023. **Placas Solares**. Disponível em: <<https://reciclabr.com.br/reciclagem/placas-solares/>>. Acesso em: 20/04/2023.

REIS, L. B dos. **Geração de energia elétrica 2.ed. rev. e atual.**— 2ª ed. Barueri, SP: Manole,2011.

RODRIGUES, Fabricio; WODIHY, Juliano; GONÇALVES, Alexandre. **Energias Renováveis: Buscando por uma Matriz Energética Sustentável**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 2, Vol. 13. pp 167-180 Janeiro de 2017 ISSN:2448-0959.

SHAMES, Irving. H. **Mecânica de Fluidos**. 3. ed. Bogotá: McGrawhill, 1995. 850 p

SILVA, E. P. **Fontes renováveis de energia: Produção de Energia para um Desenvolvimento sustentável**. 1ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

SOSNOSKI, A. S. K. B. **Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de águas**. 2015. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SOUZA, P.H.A.I. **Apresentação dos cálculos para seleção de bomba para sistema de reaproveitamento de água de poços artesianos**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 2014.

VERMA, D.; MIDTGARD, O.-M.; SATRE, T. O. **Review of photovoltaic status in a European (EU) perspective**. In: 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). p. 3292-3297, 2011.

Torres, W. **Avaliação da geração de energia elétrica de uma microturbina instalada em tubulações de água em sistemas industriais**. Tese Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2020.

YOUNG, Hugh D. **Física 4: ótica e física moderna**. 12 ed, São Paulo: Addison Wesley, 2009.