



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

LEANDRO HENRIQUE DA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MICROREDE HÍBRIDA COM FONTES RENOVÁVEIS E  
SISTEMA DE ARMAZENAMENTO ADAPTADA PARA ESTUDO EM LABORATÓRIO**

FLORIANÓPOLIS

2024

LEANDRO HENRIQUE DA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MICROREDE FLEXÍVEL COM FONTES RENOVÁVEIS E  
SISTEMA DE ARMAZENAMENTO ADAPTADA PARA ESTUDO EM LABORATÓRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a conclusão da matéria de Trabalho de conclusão de curso.

**Orientador: Julio Normey Rico, Daniel Martins**

FLORIANÓPOLIS

2024

FICHA DE IDENTIFICAÇÃO DA OBRA ELABORADA PELO AUTOR, ATRAVÉS DO  
PROGRAMA DE GERAÇÃO AUTOMÁTICA DA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DA  
UFSC.

Leandro Henrique da Silva

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MICROREDE HÍBRIDA COM FONTES RENOVÁVEIS E  
SISTEMA DE ARMAZENAMENTO ADAPTADA PARA ESTUDO EM LABORATÓRIO**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 12/11/2024

---

Prof. Julio Normey Rico, Dr.  
Orientador e Supervisor

---

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.  
Presidente da Banca

---

Prof. Daniel Martins, Dr.  
Avaliador

---

Gabriel Monteiro  
Avaliador

Sísifo, condenado a rolar uma pedra montanha acima apenas para vê-la rolar de volta ao ponto de partida, representa a luta incessante e aparentemente inútil que todos enfrentamos. Albert Camus desenvolve a ideia do absurdo em seu ensaio "O Mito de Sísifo". A vida humana é essencialmente absurda porque buscamos constantemente um significado e uma ordem que o universo não oferece e é indiferente.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, no período da minha infância agradeço a tia Lúcia, pela oportunidade de estudar em uma escola fundamental de qualidade como atleta de handebol através de uma bolsa de estudos. O início deste fim, iniciou pela oportunidade dada por vocês. Lúcia, obrigado por tudo e desculpa por qualquer coisa. Agradeço ao professor Cristiano, meu 1º treinador e um 2º pai, por ter me ensinado certos valores da vida que carrego até hoje. Ensinou competir de uma forma digna. Ensinou o valor da obsessão de um trabalho. Todos os dias treinávamos como um psicopata. Entre amigos, nos surrávamos dentro de simples treinos e isso nos fez a conquistar o primeiro troféu em equipes a nível nacional do estado do MT. Ele ensinou a aprender na derrota e na vitória. Ter compaixão e respeito a equipe inferiores, mas também, fazia arder a chama da fé quando enfrentávamos times superiores ao nosso. Mas mais do que isso, ele ensinou e continua ensinando as crianças o poder da dedicação, da repetição dia-a-dia que os fará conquistar o impossível. Ensinou comprometimento e mostrou que grandes sonhos e conquistas são concretizados com dedicação plena. Gostaria de agradecer as palavras do professor Jorge do Colégio Vinícius de Moraes por ter dito há uma criança de 10 anos que nunca conseguiria se formar em robótica. Isso atordoou minha vida até hoje. Isso fixou de uma forma na minha mente que não há um ano se quer que eu não sonho, melhor, eu não tenha pesadelo com isto. Isso me perturbava. Essa voz foi ficando cada vez maior e a maior, e eu não conseguirá fazer nada a respeito. Minha mente ficou desconfortável, porque essa voz sempre continuou lá. Eu sempre tentava evitar essa consciência. Eu queria me afastar dessa consciência, mas ela não deixava. Consciência a qual: que eu viraria o fracassado que dissera que eu seria. Me fez chorar, como choro agora, inúmeras vezes pensando que ele poderia ter razão, entretanto, colhi esta dor e este sofrimento para transformá-los em trabalho duro. mesmo, quando estava perdendo a fé da vida... e, acredite, nessa caminhada, perdi a fé em mim e na humanidade inúmeras vezes. Eu cai no vale do desespero. Visitei o fundo do poço. Mas um sonho, me fazia continuar sem entender como e o porquê. E sabe meu único desejo que peço a Deus quanto a isso?

Mas também, gostaria de agradecer a Deus por ter colocado pessoas como tia Jussara e o tio Roberto, pois eles zelaram – mas também puxaram a orelha - por mim quando criança me mostrando o caminho 'certo', o do bem.

Agradeço a meus padrinhos Laércio e Elenir. Peço perdão pela minha ausência. Estive ausente de corpo e alma há muitas pessoas e, muitas vezes, a mim mesmo. Tenham compaixão em compreender que não houve uma gota de maldade. Mas também, a Tia Sabrina e ao Tio Carlinhos por serem grandes parceiros dos meus pais e me ensinarem os 4 princípios.

Gostaria de agradecer ao tio Vitor e ao tio Francisco. Ambos os tios são referências de profissionais de sucesso que começaram do nada com muita dedicação, perfeccionismo, mesmo com condições limitantes – seja financeira ou não. Na tela do meu computador sempre teve um bloco de notas escrito o nome de vocês dois pra eu não esquecer que com muita dedicação é possível chegar aonde almejamos. Não só a eles, mas também, como a tia Lúcia e a tia Jane, que, respectivamente, são suas esposas e que comungaram das suas conquistas e das suas vitórias.

Gostaria de agradecer a meus amigos de infância e do time de Sorriso - MT. Não vou citá-los porque posso cometer a infelicidade de esquecer algum. Mas saibam que eu aprendi com cada um ser uma pessoa melhor e mais dedicada. Apesar, que o fundo do poço – muitas vezes – arrancou isso de mim. Agradeço especialmente, a todo Grupo Lucion pela oportunidade de trabalho de ser auxiliar administrativo quando ainda era uma simples 'criança' e que me ensinaram valores profissionais tão fundamentais e importantes que carrego comigo até hoje. Todas as oportunidades de trabalho na infância foram motores de uma reserva financeira de querer estudar fora. Então, agradeço por ter sido auxiliar em uma verdureira; office boy da Cleide Disk Mensagens; auxiliar da fotografia dos Bianchini; as Butinas Ubiratã que me fez apaixonar por máquinas, e conseqüentemente por Automação; e, principalmente, a oportunidade de tirar xerox na prefeitura de Sorriso-MT que me permitiu durante 2 anos colar minhas folhas de resumo na parede para eu fazer exercício de memorização enquanto fazia o trabalho manual de tirar as cópias e, assim, conquistar algumas aprovações em vestibulares de faculdades renomadas no Brasil e no mundo. Mas não o que eu almejava: Engenharia de Controle e Automação na UFSC. Na

realidade todos, cada um da sua forma, me trouxeram aprendizados profissionais e permitiram ter um pé de meia que seria utilizado para estudar em Florianópolis.

Gostaria de agradecer a Celina, que foi o meio por qual a escola Energia me possibilitou no meu último ano de cursinho uma bolsa. Último ano em que minhas reservas financeiras tinham se esgotadas e não existirá a possibilidade de fazer meu 3º ano de cursinho. Ano a qual passei em inúmeras universidades públicas, estaduais e federais, mas ainda não na qual eu sonhava: Engenharia de Controle e Automação Industrial na Universidade Federal de Santa Catarina. Todo apoio da escola Energia, representada pela Celina, pelo Prof. Waltinho, Prof. Erivaldo, Prof. Baiano, a Escola Mais representava pela Sara e Prof. Waltinho, ao CEM representados ao Prof. Erivaldo, Prof. Baiano. A bolsa ganhada em uma brincadeira-aposta com o Prof. Baiano. Foram primordiais para a conquista da primeira batalha – o vestibular - de tantas que viriam. O melhor foi a amizade de vocês. Saibam, vocês são seres iluminados que cuidam de muitas crianças que estão saindo de casa pela 1ª vez e cuidam como se fossem seus filhos. Foi um prazer conhecê-los.

Gostaria de agradecer ao Manfron, Gilmar, Gustavo, Paulo e Emanuel que sempre tiravam sarro dizendo que eu 'ia de cipó' ao cursinho porque eu era do MT. No entanto, sempre estávamos se debruçando sobre os temas de aula e era com essa leveza que levávamos o nosso comprometimento de estudo das 07h da manhã, até o horário que a biblioteca fechava. Leveza e dedicação é uma bela forma de seguir a jornada da vida.

Gostaria de agradecer a família Laffin. Marcos, Hermínia, Natália e Gustavo. Que em um, dos muitos momentos de dificuldade financeira que me assolaram, abraçaram-me e ofereceram um lindo porão com café da manhã por 150,00 mensais. Um valor – claramente - simbólico. Sem vocês não teria conseguido chegar até aqui. Obrigado. E, mais, deram muito mais do que um teto e alimento, alimentavam minha alma, cuidar de mim quando adoeci. E todos os santos dias, regados de alegria. Gustavo, irmão, sou grato a você. Guardo uma reverência enorme a ti. E lhe digo: desculpa por qualquer coisa e obrigado por tudo. Que Deus continue abençoando a sua vida, a do Pietro e a do Tiago. Continuem vivendo, e não sobrevivendo. Respeito-os demais. Sempre guardarei as boas lembranças e deixarei as más se esvanecer.

Gostaria de agradecer ao Luan e ao Rafinha, que me deram pouso quando eu não tive. Que Dividiram momentos de alegria e de tristeza. Luan, você dividiu seu



alimento comigo. Que apoiaram nas mudanças e sempre tiveram uma mente blindada, mesmo sem saber ou querer, me ensinavam o que é uma mente blindada. Carregaram e carregam com felicidade a dureza que a vida sobrepõe em nossas costas. Que Deus abençoe a suas escolhas e a todos que estão a sua volta. Rafinha, você foi uma das pessoas que salvaram minha vida.

Primeiramente, agradeço toda turma 12.1 representada pelo Fernando, pela Fernanda, pelo Pedro Casali, pelo Munir Mahmmud Garib, Vincenzo, Lili, Nataniel, Daquina, Gislaine Hoffman, Matheus Domingos e em especial Gabriel Casarin. Entretanto, todos demais sem exceção foram importantes. Gabriel foi um amigo, foi um irmão, foi um professor, foi um patrão. Excelente em tudo. O que tenho pra te dizer? Irmão, obrigado por tudo e desculpa por qualquer coisa.

Gostaria de dizer a Julia Conte, ao Parafa, a Mari Nastri, a Marina, a Marina e a Marina, ao Burigo, ao Judit, ao Gui, a Tati, ao Loch, ao Paraguai, ao Crack, ao Braúlio, ao Madimbu, ao Maurício, ao Kim, ao Tulinho, ao Carioca, ao Dan Pelliciari, ao Felpa, ao Paraguai, ao Burigo, ao Nego Dan, ao Marcelo Pedro, ao Agüero, ao Gustavo Domingos, ao Pedrinho, ao Andrézinho, ao tio Léo do Figueira, ao Gui Dantas, ao Gago, ao HU, Leko, Betinho, Alec, o AJ e que sou grato a Deus por colocar pessoas como vocês na minha vida. Cada um de vocês, da sua forma, dividiu momento de alegria, orrax, quanta alegria nós compartilhamos. Obrigados pelos risos e sorrisos. Deus é bom o tempo todo.

Gostaria de agradecer a Deus, por ter posto excelentíssimo Guilherme Dannebrock na minha vida. Ele nunca apontou o dedo e sempre acolheu o meu pior. Quando digo meu pior, refiro-me aos meus sofrimentos que está dura e exaustiva caminhada trouxe a minha mente. Mais que acolher, entre tantos psicólogos que passei, ele foi o melhor. Porque ele é uma pessoa que ele passou pelo que eu passei e a bondade do seu coração e da sua alma o fazia ter a paciência de me ouvir, comungar do mesmo pensamento e sua sabedoria trazia racionalidade sobre a mente reptiliana. Você não faz ideia quantas vezes eu fui visitá-lo, mas internamente era uma despedida definitiva. Obrigado por salvar minha vida.

Agradeço a Deus, por ter colocado em minha vida o Arthur. Dividimos a caminhada desde 2008 quando cheguei em Florianópolis. Cara, não tem palavras suficiente que cheguem perto da representatividade sua. Eu sinto a manifestação de Deus através de 6 pessoas que estão em meu círculo de amizade: Coisa, o Mano, tu,

Rafinha, o Marcus e o Parafa. É como o cuidado, o zelo e o apoio do Prof. Julio é uma manifestação de Deus. Nós sabemos como os últimos anos tem sido difícil e, se não fosse vocês, junto a minha família eu não estaria vivo hoje. É minha fé. Obrigado por salvarem minha vida.

Gostaria de agradecer ao Coisa. Éis um exemplo pra mim. Famoso, sem palavras. Obrigado por compartilhar as madrugadas estudando e fazendo trabalho nos laboratórios. Obrigado, pelo sofá quando não tinha teto. Obrigado, pelo cigarro. Obrigado pelas conversas. Obrigado por mesmo sendo difícil ter fé em minhas palavras, você fez o que tinha que ser feito para me ajudar. É difícil pra eu falar de você. Porque é tanta, mas tanta, coisa que passamos que só quero que você tenha em mente onde eu estiver, carregarei em meu coração. Obrigado por salvar minha vida. E nunca esqueça, quando precisar, é só chamar!

Gostaria de agradecer ao Prof. Julio, Prof. Marcelo, Prof. Americano, por confiarem a mim a execução de um trabalho que nem eu mesmo acreditaria que seria capaz. Tenham a certeza de que dentro de acertos e erros... não sei qual a impressão que ficará, porém em nenhuma – nenhuma – ação teve má-fé. Hoje, olho pro trabalho, vejo que escolheria melhor a quem confiar e faria coisas diferentes. Estava completamente pressionado, em um contexto extremamente delicado sendo pressionado pelo lado A e pelo lado B. Dentro do meu conhecimento, dentro das pessoas que eu conhecia que poderiam ajudar neste trabalho, pois não havia ninguém que teria executado uma microrrede híbrida aqui em Florianópolis. Então, a grande maioria queria pegar apenas a parte que envolveria o sistema fotovoltaico, sem o comprometimento com o resto. Dentro do cenário que eu estava tentei dar meu melhor, e se meu melhor não foi o suficiente, tudo bem; entretanto, deixo claro para tomar cuidado com as más impressões. Entretanto, saio não sei se satisfeito como meu trabalho, mas saio feliz e com a consciência limpa. Não sou digno do conhecimento das pessoas que pisam neste laboratório. Vocês além de serem sábios, vocês estão estudando e fazendo acontecer o futuro. Tenham certeza que muito mais que um impacto positivo na engenharia é o que vocês estão plantando, semeando e já colhendo. Em outras palavras, digo que sou fã de cada um de vocês. Eu só vou pegar alguns livros de cálculo e física e reler e refazer por prazer. Pegar alguns materiais com o professor que esteja de coração de aberto, e reestudar o que eu aprendi nessa jornada. E saiba que não foi fácil.

Sabe o porquê de não ser fácil? Porque não pude me dedicar plenamente aos estudos. Isso que estou comentando com vocês não representa o que aconteceu pós pandemia que se transformou em um outro cenário completamente diferente. Mas quando estudávamos pré pandemia eu dividia meu tempo com pintura, faxina, pequenas reformas, UBER, fui churrasqueiro do Outback nas madrugadas, entre outras inúmeras coisas. Famoso assombro do dia 05. Mas reconheço que muito das minhas escolhas me colocaram em situações piores e sou, fui e serei penalizado sempre quando for fraco e não ter a convicção da ação correta.

Agradeço ao Prof. Montez que em uma infelicidade me afundou em uma depressão, praticamente, definitiva pois até hoje não sai dela. Mas é isso, mesmo. Eu agradeço e se estou onde estou, como estou é porque Deus quis. Desejo saúde e felicidade a você e toda sua família, Prof. Montez. Agradeço, Prof. Rabelo pois nessa tentativa minha de ter um TCC que me insira no mercado de trabalho ele me apoiou, num momento que meu estado psicológico prejudicou tudo. Ele teve compaixão, mas também se manteve firme e forte em suas convicções. Eu sou grato a ele por isso, pois foi isto que o Cristiano fazia. Tocava em nossas feridas, fraquezas para sermos melhores com a sabedoria e respeito de tocá-las como devem ser tocadas. Também, jamais deixarei de esquecer de agradecer ao Prof. Hector e ao Prof. Felipe pela paciência, pelo tempo e pelas palavras. Meu Deus, como vocês foram pacientes. Como vocês tiveram compaixão. Como tiveram empatia. Eu sei que consumi demais de vocês. Peço perdão e que nunca mais o Filipe precise atravessar a rua a meu ver. Perdão, Filipe. Só tenho carinho e admiração por vocês. Desejo saúde e felicidade a todos da família de vocês. Que nunca ninguém da família de vocês passem pelo o que eu passei. Não desejo nem ao meu pior inimigo, passar pelo o que passei. Lutar contra vícios e o suicídio é espiritualmente árduo e insano. Agradeço ao professor Flesch por ainda ter a hombridade de me cumprimentar após a forma que me comportei com ele. E gostaria muito de conversar contigo sobre duas coisas da maneira mais sincera, franca e transparente possível. Até hoje acredito que te atacaram, através de mim. Só lhe digo uma coisa, estava desesperado. Olha o que aconteceu com o Alcioni. Acho que só estou vivo porque gritei aos 4 ventos, porque suportar todas as humilhações sorrateiras é difícil e eu sei quem sabe e quem não sabe sobre essa estória contadas sobre minha história.

Por fim, mas mais importante, jamais poderia deixar de esquecer de deixar meus sentimentos de agradecimentos a Livia e ao Rodrigo. Não há palavras que represente a compaixão existente dentro destes dois. Rodrigo, talvez, por que passou por algo parecido, mas a Livia só mostra o seu lado de luz. Ela só me deu apoio. Ela compreendeu que às vezes eu só não tinha força de enfrentar os pequenos problemas. Me escondia como podia: através de pequenas mentiras, drogas, minha própria mente ou em algum lugar isolado da ilha com algum utensílio tentando se matar.

E, o Alcioni, não consigo escrever. Sempre quando minha mente lembra dele, lembra do sorriso e da alegria que ele carregava. E, por Deus, como fica claro que o último ato não é motivo para entrada no reino dos céus, na casa de Deus.

Gostaria de agradecer ao Adailton e a Rosilda, a tia linda e o tio Makcson, a tia Cris e tio Volney, as primas Dani e Daia, a tia Wolnete, a tia Lena, a tia Terê, e é claro pro grande Clóvis. A toda família Bissoli e Silva. Aos mais de 100 parentes de 1º grau. Engraçado e louco pensar isso. Mas, acabo de encher o olho de lágrimas... presta atenção. O que eu vou dizer, por mais simples que pareça, no momento que eu passo é muito difícil. É com vocês que eu sinto segurança.

Pai e mãe, e vocês? O que falar? Como me expressar? Com tudo – tudo – que vocês fizeram por mim. Como não chorar? Como não querer aproveitar cada instante da vida que nós temos no lado de vocês? Como não ter medo de perder vocês, seja pelo motivo A ou B. Meu Deus, sem vocês não estaria vivo. Foi muito difícil desde quando sai de casa. Eu deveria ter aberto a “Microlins”, ao invés de ter saído pra estudar. Foram tantas coisas que aconteceram. Vi tanta sujeira na rua. Muitas vezes, não tinha coragem de falar o gasto verdadeiro de aluguel e alimentação. Fiz de tudo para ajudar proporcionalmente com o que vocês me ajudavam. E meu Deus, vocês ajudavam com tudo que podia. Foi um período muito difícil pra todos nós, mas Deus a de nos abençoar que nossos próximos anos sejam felizes. Que vocês consigam conquistar o sonho de vocês. Se eu falei em manifestação de Deus aqui, pode ter certeza que vocês dois são uma forma dele. Obrigado por sempre respeitarem minhas escolhas, mas não só respeitá-las, e sim pensando comigo. Fazendo eu sempre seguir o caminho correto. Eu tentei, por mais que, às vezes, a gente distorce o que é o certo... eu tentei seguir seus ensinamentos. E a cada vacilo que eu dava fora no sentindo do que vocês me diziam, mais claro foi ficando o quanto vocês estavam

corretos. Obrigado, por acreditar em mim. Deus nos abençoará e eu vou sair do fundo do poço. Acredite nestas palavras. Vocês foram professores da vida e me ensinam até hoje. Só peço perdão a Deus e que ele faça honrar vocês dois, porque quando eu sai de casa o único motivo era dar uma vida melhor pra gente e o que a gente acreditava que isso seria através dos estudos. E olha hoje? Filinho e Lucas felizes. E eu? Não sei.

Tão importante esse apoio familiar, foi o apoio técnico do prof. Daniel Martins, Julio Normey, do engenheiro Gabriel Casarin e Gabriel Monteiro, e também, do Abdulai, ao de Paulo Chaves e Filip. Pessoas que dedicaram seu tempo para apoiar tecnicamente este projeto. Entre acertos e erros, foram vocês que possibilitaram eu chegar a este ponto: entrega do TCC e o final da graduação, tão desejado por mim. Vocês são fonte de inspiração para mim.

Por fim e mais importante, obrigados a TODOS professores do DAS por compartilhar seu conhecimento, obrigado Rodrigo e Lívia, obrigado Vanderlei José da Silva, Vanderlei José da Silva Filho, Lucas Gabriel da Silva e Elizabet Bissoli da Silva.

## DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 01 de Dezembro de 2024.

Na condição de representante do no Laboratório Multiusuário do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Controle e Automação de Processos de Energia, INCT CAPE na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização online no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa nº 126/2019/CUn. Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.

---

Prof. Julio Normey Rico, Dr.

## RESUMO

Um dos maiores paradigmas que a humanidade enfrenta hoje são as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas globais. O aumento da temperatura em 4°C até o final do século é uma ameaça real que pode levar a eventos climáticos extremos e acidificação dos oceanos. A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera está aumentando devido à queima de combustíveis fósseis e desmatamento, contribuindo para o aquecimento global. A elevação do nível do mar ameaça comunidades costeiras, ecossistemas marinhos e infraestruturas ao redor do mundo. Prova disso são os esforços de cooperações internacionais como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (Estocolmo, 1972), Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), Protocolo de Quioto (1997), Acordo de Paris (2015), COP 28 (Emirados Árabes Unidos, 2023). Portanto, há uma ampla e vasta discussão para compreender as modernizações necessárias dos sistemas convencionais de distribuição de energia. Assim, nas últimas décadas notou-se um esforço público e privado que se destacaram: integração de muitos Recursos de Energia Renovável (RERs), unidades de armazenamento e cargas; e a descentralização da rede. No entanto, a integração das unidades RER trazem vários desafios para a estabilidade e operação do sistema. Esses desafios surgem como o controle, a proteção, a estabilidade operacional e a confiabilidade das redes. Neste sentido, o Laboratório Multiusuário do INCT CAPES da Universidade Federal de Santa Catarina se propõe a realizar estudos que corroborem e vão ao encontro destas diretrizes. Para isto, neste estudo, implementamos uma micro rede (uR) conectada à rede com fonte de energias renováveis eólica e fotovoltaica para alimentação de cargas com sistema de armazenamento para viabilizar a implementação de teorias de controle em que gerenciam tanto o lado de produção quanto o de demanda.

**Palavras-chave:** microrede, energia renovável, geração eólica, sistema fotovoltaico, sistema de armazenamento.

## ABSTRACT

One of the biggest paradigms facing humanity today is greenhouse gas emissions and global climate change. Temperature rises of 4°C by the end of the century are a real threat that could lead to extreme weather events and ocean acidification. The concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere is increasing due to the burning of fossil fuels and deforestation, contributing to global warming. Rising sea levels threaten coastal communities, marine ecosystems and infrastructure around the world. Proof of this are international cooperation efforts such as the United Nations Conference on the Human Environment (Stockholm, 1972), United Nations Conference on Environment and Development (Rio-92), Kyoto Protocol (1997), Paris Agreement (2015), COP 28 (United Arab Emirates, 2023). Therefore, there is a broad and vast discussion to understand the necessary modernizations of conventional energy distribution systems. Thus, in recent decades there has been a notable public and private effort: integration of many Renewable Energy Resources (RERs), storage units and loads; and the decentralization of the network. However, the integration of RER units brings several challenges to the stability and operation of the system. These challenges arise as control, protection, operational stability and reliability of networks. The guidelines for the future of the electrical grid include some guidelines, in a general way they are: flexible, accessible, reliable and economical. In this sense, the Innovation Laboratory of the Federal University of Santa Catarina proposes to carry out studies that corroborate and meet these guidelines. To achieve this, in this study, we designed a micro rede (uR) connected to the grid with a wind and photovoltaic renewable energy source to supply loads with a storage system to enable the implementation of control theories that manage both the production side and the of demand.

**Keywords:** microgrid, renewable energy, wind generation, photovoltaic system, storage system.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira 2022 (Balanço Energético Nacional BEN, 2023). .....	28
Figura 2 - Comparação entre o potencial de recursos e demanda de energia no horizonte do PNE 2050 .....	29
Figura 3 - Representação do Sistema Interligado Nacional (SIN).....	30
Figura 4 - Exemplo de uR .....	31
Figura 5 - Configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede.....	37
Figura 6 - A hybrid AC DC micro-grid system. ....	39
Figura 7 - Origem de fontes primárias renováveis e Transformações Energéticas. ..	45
Figura 8 - Processos de conversão da Biomassa. ....	49
Figura 9 - Sistemas de conversão de Biomassa. ....	50
Figura 10 - Coletores solares térmicos instalados no telhado de uma residência.....	51
Figura 11 - Torre Central e heliostatos.....	52
Figura 12 - Origem e Transformações Energéticas da Radiação Solar.....	53
Figura 13 - Perfil da irradiância solar ao longo de um dia. ....	54
Figura 14 - Primeira instalação fotovoltaica conectada à rede elétrica no Brasil Fonte. .....	57
Figura 15 - Total diário da irradiação global horizontal .....	58
Figura 16 - Influência da variação de irradiância solar na célula fotovoltaica.....	60
Figura 17 - Módulos fotovoltaicos conectados em série (esquerda) e curva I-V (direita). .....	61
Figura 18 - Declinação Solar. ....	62
Figura 19 - Movimento Solar Diurno no Hemisfério Sul. ....	63
Figura 20 - Sombreamento no telhado (solstício de inverno). ....	64
Figura 21 - Sombreamento no telhado (solstício de verão).....	65
Figura 22 - Demonstração do ângulo ótimo para inclinação de painéis solares.....	66
Figura 23 - Inclinação recomendada conforme a latitude geográfica. ....	66
Figura 24 - Mapa do potencial eólico brasileiro a 50 metros. ....	71
Figura 25 - Desafios por período de tempo (PNE 2050) .....	72
Figura 26 - Evolução esperada da expansão da fonte eólica no Cenário Desafio da Expansão. ....	73

Figura 27 - Nova tecnologia de turbina eólica de eixo horizontal - The Archimedes LIAM F1.....	74
Figura 28 - Princípio de funcionamento Vortex Bladeless. ....	74
Figura 29 - Iberdrola e seu maior parque eólico onshore do mundo com 1.000MW na Austrália. ....	75
Figura 30 - Grupo de energia dinamarquês Orsted: projeto Walney Extension. Na costa noroeste da Inglaterra. ....	76
Figura 31 - Variações do aquecimento oceânico.....	77
Figura 32 - Distribuição geral dos ventos .....	77
Figura 33 - Componentes de um sistema eólico. ....	79
Figura 34 - (a) Torre tubular e (b) torre treliçada. ....	80
Figura 35 - Aumento da velocidade do vento com a altura. ....	81
Figura 36 - Turbina eólica de eixo vertical: WS-4.....	82
Figura 37 - Turbina eólica de eixo horizontal.....	83
Figura 38 - Coeficientes de potência e torque para várias topologias de rotores eólicos. ....	84
Figura 39 - Tipos de turbinas quanto à posição das pás em relação ao vento incidente. ....	85
Figura 40 - Gerador Elétrico WEG – W22 Premium.....	86
Figura 41 - Multiplicador de velocidade.....	87
Figura 42 - Hub. ....	88
Figura 43 - Cúpula frontal.....	88
Figura 44 - Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	92
Figura 45 - Posicionamento das tecnologias de armazenamento em função da sua capacidade de energia armazenada, potência e tempo de descarga. ....	94
Figura 46 - Potência específica por Energia específica .....	96
Figura 47 - Eficiência por Ciclo de Vida.....	97
Figura 48 - Comparação do custo por armazenamento .....	98
Figura 49 - Ar Comprimido .....	100
Figura 50 - Inversores Independentes.....	103
Figura 51 - Acoplamento da Bateria ao Retificador Eólico .....	104
Figura 52 - Inversor Híbrido.....	105
Figura 53 – Planta de situação e localização .....	107

Figura 54 – Diagrama de blocos da uR.....	108
Figura 55 – Diagrama Multifilar da uR.....	109
Figura 56 - curva I-V para diferentes temperaturas.....	111
Figura 57 - curva P-V para diferentes irradiações.....	111
Figura 58 – Módulos fotovoltaicos.....	112
Figura 59 - Strings.....	113
Figura 60 - String Box Clamper 2040 V 2E 2S.....	115
Figura 61 - QPCC Stringbox Módulos.....	117
Figura 62 - Detalhadamente QPCC dos módulos.....	117
Figura 63 - QPCA instalado.....	118
Figura 64 - Quadro de proteção CA.....	120
Figura 65 - QPCA - Quadro de proteção CA.....	120
Figura 66 – Trecho QPCA até o QGBT.....	121
Figura 67 - Inversor híbrido Deye SUN-12K-SG04LP3-EU.....	122
Figura 68 – Diagrama Trifilar.....	128
Figura 69 - Bateria da Unipower da Família UPLFP48 de LiFePO4.....	131
Figura 70 - Bateria conectada ao sistema.....	133
Figura 71 - Bateria conectada ao sistema.....	134
Figura 72 - Disjuntor do QPCC 2.....	135
Figura 73 - Barramento CC.....	136
Figura 74 - Modelo de emulação com um motor M, um sensor de torque, um gerador G.....	137
Figura 75 – O moto-gerador.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 76 - Emulador do gerador eólico.....	140
Figura 77 – Diagrama Unifilar.....	141
Figura 78 - Normas de atendimento da CELESC.....	142
Figura 79 - Diagrama unifilar e multifilar.....	143
Figura 80 - Diagrama Funcional Multifilar.....	144
Figura 81 - Diagrama Unifilar.....	145
Figura 82 - Quadro de proteção CA e CC do fotovoltaico.....	146
Figura 83 - Modelo se sistema: Energia e Clima.....	148
Figura 84 - Expectativa areal de produção energética mensal.....	149
Figura 85 - Mês de setembro.....	150

Figura 86 - Mês de outubro .....	150
Figura 87 - Financeiro - autoconsumo em %.....	151
Figura 88 - Orçamento da Kaju .....	151

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens vs desvantagens turbina de eixo vertical.....	82
Quadro 2 - Vantagens vs desvantagens turbina de eixo horizontal.....	83
Quadro 3 - Características dos Sistemas de Armazenamento 2016-2030.....	93
Quadro 4 - Especificação do módulo Honor Solar de 550W (modelo HY- M10/144H-550W).....	110
Quadro 5 - Proteções existentes .....	123
Quadro 6 - Características técnicas do inversor Características técnicas do inversor. ....	124
Quadro 7 - Datasheet inversor > bateria .....	125
Quadro 8 - Datasheet inversor > módulos.....	126
Quadro 9 - Datasheet inversor > Saída CA.....	126
Quadro 10 - Produção energética mensal.....	147
Quadro 11 - Comparativo Mensal de Expectativa e Geração Real de Energia (kWh) .....	148
Quadro 12 - Geração de Energia Mensal e Variações (kWh).....	149

**LISTA DE TABELAS  
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
DPS – Dispositivo de Proteção Contra Surto  
EGEC – European Geothermal Energy Council  
EV – Veículo Elétrico  
G – Irradiância Global Horizontal  
GC – Geração Concentrada  
GD – Geração Distribuída  
Gdif – Irradiância Difusa Horizontal  
Gdir – Irradiância Direta Horizontal  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
Gi – Irradiância no Plano Inclinado  
Gn – Irradiância Direta Normal  
Imp – Corrente de Máxima Potência  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Isc – Corrente de Curto-Circuito  
LiFePO<sub>4</sub> – Lítio Ferro Fosfato  
MME – Ministério de Minas e Energia  
MPPT – Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)  
PNE – Programa Nacional Energético  
QGBT – Quadro Geral de Baixa Tensão  
QPCA – Quadro de Proteção de Corrente Alternada  
QPCC – Quadro de Proteção de Corrente Contínua (gerenciamento da bateria - BMS)  
RED – Recurso Energético Distribuído  
RER – Recursos Energéticos Renováveis  
SI – Silício  
SIN – Sistema Integrado Nacional  
STC – Condições Padrão de Testes  
TEP – Tonelada Equivalente de Petróleo

uR – Micro Rede

Voc – Tensão de Circuito Aberto

Vmp – Tensão de Máxima Potência

ESS – Energy Storage Systems (Sistemas de Armazenamento de Energia)

FIG – Fed Induction Generator (Gerador de Indução Duplamente Alimentado)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	27
1.1 LABORATÓRIO .....	32
1.2 JUSTIFICATIVA .....	32
1.3 OBJETIVOS .....	33
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>34</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>34</b>
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	34
<b>2 MICRO REDE (uR)</b> .....	<b>36</b>
2.1 CONCEITO .....	36
2.2 MICRO REDE HÍBRIDA .....	38
2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	39
<b>3 RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS</b> .....	<b>43</b>
3.1 FONTES .....	44
<b>3.1.1 Fonte Energética Renovável</b> .....	<b>45</b>
3.1.1.1 <i>Fonte hidrelétrica</i> .....	46
3.1.1.2 <i>Fonte Geotérmica</i> .....	47
3.1.1.3 <i>Fonte por biomassa</i> .....	47
3.1.1.4 <i>Fonte solar térmica</i> .....	50
3.1.1.5 <i>Fonte solar</i> .....	52
3.1.1.5.1 Componentes de um sistema fotovoltaico .....	59
3.1.1.5.1.1 Células fotovoltaicas .....	60
3.1.1.5.1.2 Módulos fotovoltaicos .....	60
3.1.1.5.1.3 Inversores Fotovoltaicos .....	66
3.1.1.5.1.4 String Box CC e Caixa De Proteção CA .....	68
3.1.1.5.1.5 Aterramento CC e CA .....	68
3.1.1.6 <i>Fonte Eólica</i> .....	70
3.1.1.6.1 Vento .....	76
3.1.1.6.2 Componentes De Um Sistema Eólico Tradicional .....	78
3.1.1.6.2.1 Torre .....	80
3.1.1.6.2.2 Rotor .....	81
3.1.1.6.2.2.1 Turbina de Eixo Vertical .....	81



3.1.1.6.2.2 Turbina de Eixo Horizontal .....	82
3.1.1.6.3 Gerador .....	85
3.1.1.6.4 Nacelle ou Cabin .....	86
3.1.1.6.5 Multiplicador .....	87
3.1.1.6.6 Cubo.....	87
3.2 CONVERSORES .....	88
<b>3.2.1 Quanto a Tecnologia Empregada.....</b>	<b>89</b>
3.2.1.1 Conversores CC-CC.....	89
3.2.1.2 Inversores CC-AC .....	90
3.2.1.3 Retificador CA-CC.....	91
3.3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTOS .....	92
<b>3.3.1 Armazenamento de Energia por Volante de Inércia .....</b>	<b>98</b>
<b>3.3.2 Supercapacitor .....</b>	<b>99</b>
<b>3.3.3 Baterias .....</b>	<b>99</b>
<b>3.3.4 Célula de Combustível de Hidrogênio .....</b>	<b>100</b>
<b>3.3.5 Armazenamento de Energia de Ar Comprimido .....</b>	<b>100</b>
<b>3.3.6 Armazenamento Hidráulico Bombeado.....</b>	<b>101</b>
<b>3.3.7 Energia Solar Concentrada (CSP).....</b>	<b>101</b>
<b>4 CENÁRIOS .....</b>	<b>102</b>
4.1 INVERSORES INDEPENDENTES .....	102
4.2 ACOPLAMENTO DA BATERIA AO RETIFICADOR EÓLICO.....	103
4.3 INVERSOR HÍBRIDO.....	104
<b>5 PROJETO DA uR HÍBRIDA.....</b>	<b>106</b>
5.1 MÓDULOS .....	110
<b>5.1.1 Quatro de Proteção de Corrente Contínua (QPCC).....</b>	<b>115</b>
<b>5.1.2 Quadro de Proteção de Corrente Alternada (QPCA).....</b>	<b>118</b>
<b>5.1.4 Ponto de Acoplamento a Rede.....</b>	<b>121</b>
5.2 INVERSOR.....	121
5.3 BATERIA .....	129
5.4 EMULADOR.....	136
5.5 PONTO DE CONEXÃO COM A REDE.....	141
<b>6 RESULTADOS .....</b>	<b>147</b>
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>153</b>

<b>REFERENCIAS</b> .....	155
<b>ANEXOS</b> .....	161

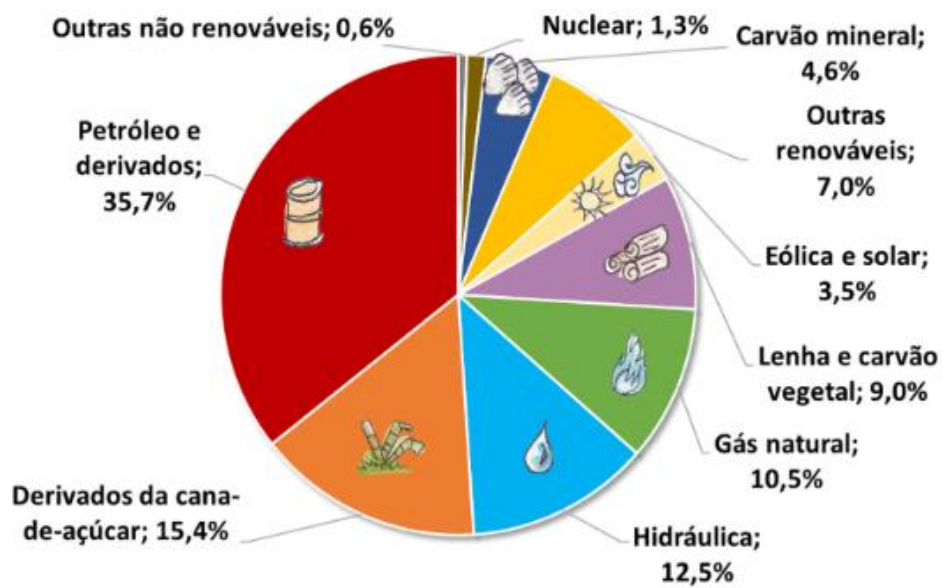
## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da temperatura global em 4°C representa uma ameaça iminente, caso medidas urgentes não sejam tomadas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Se o cenário continuar inalterado, eventos climáticos extremos se tornarão mais frequentes, os oceanos se acidificarão, e a perda de biodiversidade será acelerada. As principais causas dessa trajetória incluem a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e outras atividades humanas, que aumentam a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, um dos principais responsáveis pelo efeito estufa e o consequente aquecimento global.

Entre as consequências visíveis do aquecimento global está a elevação do nível do mar, provocada pelo derretimento de geleiras e o desmantelamento dos mantos de gelo. Esse fenômeno ameaça diretamente comunidades costeiras, ecossistemas marinhos e infraestruturas globais, reforçando a necessidade de estratégias de mitigação eficazes. A transição para fontes de energia renováveis surge como uma solução relevante, reduzindo a poluição e a dependência de combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que contribui para o desenvolvimento econômico e social.

O Brasil, com uma matriz elétrica diversificada e um grande potencial para a expansão de energias eólica e solar, destaca-se como um líder no uso de fontes renováveis. A Figura 1 ilustra essa diversidade energética, evidenciando a relevância de fontes sustentáveis no país. O avanço da Geração Distribuída (GD), impulsionada por legislações que incentivam a adoção de micro rede (uR) e recursos energéticos distribuídos, permite aos consumidores gerarem sua própria energia, diminuindo significativamente a emissão de gases poluentes e fortalecendo a transição energética para um modelo mais sustentável.

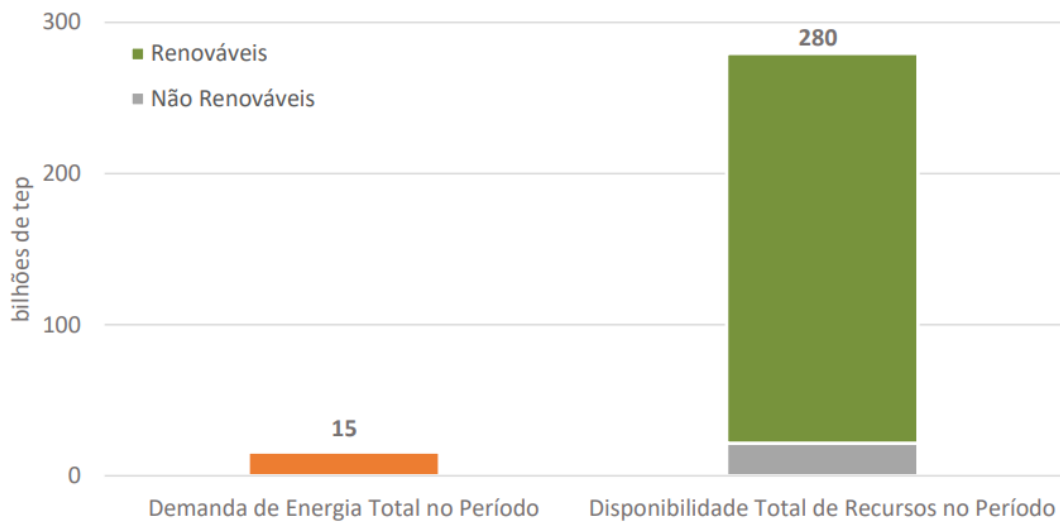
Figura 1 - Matriz elétrica brasileira 2022 (Balanço Energético Nacional BEN, 2023).



Fonte: Brasil, 2022

Em uma comparação entre o potencial de recursos e demanda de energia no horizonte as expansões da oferta e de consumo de energia se farão de forma sustentável, com a manutenção dos indicadores de renováveis: entre 45 e 50% na matriz energética, e entre 80 e 85% na matriz de geração elétrica. Os estudos do Programa Nacional de Energia (PNE) apontam para um potencial energético de quase 280 bilhões de Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP) no horizonte até 2050, como visto na Figura 2.

Figura 2 - Comparação entre o potencial de recursos e demanda de energia no horizonte do PNE 2050



Fonte: Brasil, 2020.

Segundo Wang *et al.* (2022) com o rápido crescimento do consumo de energia e a crescente atenção das pessoas à proteção ambiental, várias medidas foram tomadas para reduzir as emissões de carbono dos sistemas elétricos, que são divididas principalmente em duas categorias, uma é usar a energia renovável e mudar o quadro do sistema de baixo carbono e a outra é usar os mecanismos de regulação do mercado, incluindo o comércio de carbono e o imposto sobre o carbono.

Como exemplo das políticas de descarbonização e impactos ambientais são os programas de transição energética do Brasil e a reforma do setor elétrico brasileiro, que visam garantir a segurança energética e a qualidade no atendimento à população. A descarbonização da matriz elétrica brasileira e do setor de energia requer planejamento energético eficiente e um arcabouço regulatório adequado. Estratégias para um futuro sustentável incluem a eletrificação de frotas e a transição para fontes de energia com baixas emissões de carbono. Essas políticas têm impactos significativos nas redes elétricas, incluindo a necessidade de infraestrutura adequada e a gestão eficiente da demanda e oferta de energia.

De acordo com Mariam *et al.* (2013), a pesquisa sobre diferentes configurações de sistemas de microrredes tem ganhado relevância, especialmente com o aumento da integração de fontes de energia renováveis. Esse foco visa facilitar a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e apoiar o alcance de metas sustentáveis.

O Sistema Integrado Nacional (SIN) de energia, ilustrado na Figura 3, opera com um modelo de produção centralizada, onde a eletricidade é gerada em grandes usinas e transmitida para consumidores localizados a longas distâncias. Esse modelo apresenta desvantagens, como as significativas perdas de energia ao longo do processo de transmissão.

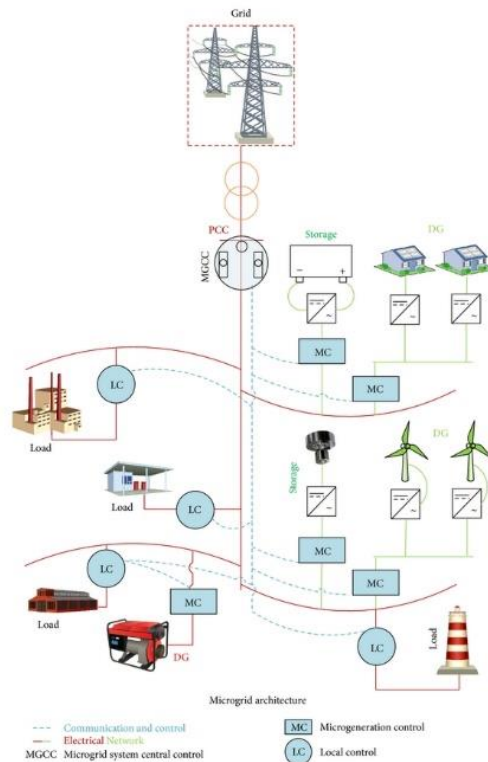
Figura 3 - Representação do Sistema Interligado Nacional (SIN)



Fonte: Pereira *et al.* 2017.

A Geração Distribuída regulamentada pela legislação, permite a integração de uRs ao SIN, promovendo maior adoção de fontes de energia renováveis. Essa configuração descentraliza a geração de energia, com várias unidades menores operando em locais distintos, o que diminui a vulnerabilidade a interrupções e reduz os custos de transmissão. A arquitetura básica de uma uR é composta por fontes de geração, conversores de energia, sistemas de armazenamento, distribuição, e sistemas de comunicação e controle (Mariam *et al.*, 2013), como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de uR



Fonte: Mariam *et al.* 2013.

A uR apresentada na Figura 4 integra fontes de energia renováveis e não renováveis. Nele contém sistemas fotovoltaicos e eólicos, além de um gerador a diesel. Na parte superior direita, uma uR residencial é apresentada com um sistema de armazenamento por bateria, que, junto com seu inversor, está conectado ao controlador. Abaixo, à direita, há uma uR com um sistema de armazenamento denominado Armazenamento de Energia por Volante de Inércia, conhecida como *Flywheel Energy Storage* (FES), que armazena energia cinética por meio de uma massa rotativa, sendo sua capacidade proporcional à massa e à velocidade de rotação do volante. À esquerda, tanto na parte superior quanto inferior, são mostradas conexões de edifícios residenciais ou industriais e geração a diesel com cargas conectadas à uR.

A arquitetura de uma uR, como apresentada na Figura 4, exemplifica a transição energética em curso, que promove a substituição de fontes de energia convencionais por renováveis, integrando um sistema energético descentralizado,

eficiente e confiável. Essa transição é discutida no Programa Nacional Energético (PNE) 2050 do Brasil, desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

O PNE afirma que o processo de transição energética vigente consiste em um processo de transformações em direção a uma economia de baixo carbono e menor pegada ambiental. No PNE dão-se estímulos ao uso mais eficiente dos recursos energéticos e à redução da participação de combustíveis mais intensivos em emissões de carbono na matriz energética primária mundial em favor de fontes de baixo carbono bem como à eletrificação em processos de conversão de energia, tal processo – no contexto brasileiro - ocorre associado a maior participação de fontes renováveis como eólica e a solar (Brasil, 2020).

A transição energética resulta em mudanças significativas nos sistemas socioeconômicos e suas interações com o meio ambiente. A próxima transição energética será fundamentada na eletrificação, principalmente com base em geração renovável, biocombustíveis e eficiência energética impulsionada pela digitalização. O Brasil contém uma ampla gama de fontes de energia. Uma parcela significativa é composta de recursos renováveis (Brasil, 2020).

## 1.1 LABORATÓRIO

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Multiusuário do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Controle e Automação de Processos de Energia, INCT CAPE, instituto nacional de ciência e tecnologia para controle e automação de sistemas de energia. O laboratório em fase de implantação será um ambiente para pesquisa multidisciplinar nos temas de energia.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O aproveitamento de recursos energéticos depende da viabilidade técnica e econômica, a qual envolve uma série de variáveis e restrições, incluindo fatores geológicos - no caso dos minerais - e aspectos tecnológicos, legais, regulatórios, ambientais, sociais e governamentais. Nos últimos anos, a adoção crescente de energia eólica e solar pode ser atribuída à conscientização sobre as mudanças



climáticas e à queda nos custos dos equipamentos, tornando essas tecnologias mais acessíveis, com um menor tempo de retorno sobre o investimento. Além disso, políticas governamentais e incentivos fiscais têm desempenhado um papel crucial nesse aumento de adesão a fontes renováveis.

Neste estudo, optou-se por utilizar fontes de energia eólica e fotovoltaica, dada sua disseminação no Brasil. Implementou-se uma uR conectada à rede, com sistemas de armazenamento, a fim de viabilizar o uso de teorias de controle que gerenciam tanto a produção quanto a demanda de energia. Com o agravamento da crise energética global, preocupações com o esgotamento de combustíveis, escassez de eletricidade e aquecimento global tornaram-se mais críticas, posicionando as energias solar e eólica como soluções limpas e renováveis. As uR's, nesse contexto, atuam como interfaces essenciais, conectando geradores distribuídos com base em recursos renováveis ao sistema de energia (Saeed *et al.* 2021).

O modelo tradicional de geração de energia no Brasil, denominado Geração Concentrada (GC), é caracterizado pela produção em grandes usinas, geralmente localizadas distantes dos centros de consumo, o que requer uma ampla rede de transmissão e distribuição para levar energia aos consumidores. Nesse cenário, as fontes alternativas e a GD aumentam a confiabilidade do SIN, atuando como um suporte em momentos críticos, como em períodos de escassez hídrica. A GD não apenas auxilia no fator de capacidade de outras usinas, como também adia investimentos em novas linhas de transmissão (Casarin, 2019). Com o crescimento populacional e a modernização acelerada, a demanda por eletricidade aumenta, tornando claro que os recursos energéticos tradicionais e o sistema centralizado de geração não são adequados para garantir um futuro sustentável e com disponibilidade plena para a população.

### 1.3 OBJETIVOS

Aqui há de discutir os objetivos deste trabalho apresentando suas especificidades.

### 1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo o projeto e desenvolvimento de uma uR flexível conectada à rede com fonte de energias renováveis eólica, representada por um emulador eólico, e fotovoltaica para alimentação de cargas com sistema de armazenamento para viabilizar a implementação de teorias de controle em que gerenciam tanto o lado de produção quanto o de demanda.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analisar o conceito e as características da uR híbrida no contexto de geração distribuída.
2. Definir a topologia de rede adequada para o laboratório considerando as especificidades da presença do moto-gerador a qual emula um sistema eólico.
3. Dimensionar e executar a instalação de um sistema de produção de energia com fontes renováveis com tecnologias de mercado.
4. Realizar a integralização da uR com o emulador eólico e implementação do sistema de armazenamento.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos principais. O primeiro capítulo, explora o conceito e as características das uR's, com foco nas uR's híbridas, que combinam diferentes fontes de energia para garantir maior confiabilidade e eficiência. Este capítulo também traz uma revisão de literatura, reunindo as principais teorias e estudos acadêmicos sobre o tema, permitindo uma compreensão mais profunda das tecnologias envolvidas e dos desafios enfrentados na implementação dessas redes. Além disso, é discutido como as uR's podem contribuir para a descentralização do fornecimento de energia, otimizando recursos locais e garantindo maior sustentabilidade.

O segundo capítulo se concentra nos recursos energéticos distribuídos, detalhando as fontes renováveis utilizadas, como hidrelétrica, solar, eólica e biomassa, além dos sistemas de conversão e armazenamento que complementam esses recursos. São apresentados os diferentes tipos de conversores e tecnologias de armazenamento, como baterias e supercapacitores, fundamentais para a operação de sistemas que aproveitam fontes renováveis de energia.

No terceiro capítulo, são discutidos cenários específicos de configuração de sistemas híbridos. São abordadas as opções de utilização de inversores independentes, o acoplamento de baterias a retificadores eólicos e a utilização de inversores híbridos, explorando os desafios e benefícios de cada configuração para a operação de uma microrede eficiente e flexível.

O quarto capítulo é dedicado ao desenvolvimento do projeto de uma microrede híbrida. Nesta parte, são detalhados os componentes essenciais, como módulos fotovoltaicos, quadros de proteção de corrente contínua e alternada, inversores, baterias e emuladores. O foco está na explicação de cada elemento necessário para o funcionamento do sistema, incluindo o ponto de conexão com a rede, que permite a integração da microrede ao sistema de distribuição de energia.

Por fim, o quinto capítulo apresenta os resultados do projeto, fornecendo uma análise de desempenho e discutindo os desafios encontrados. Essa seção avalia as limitações identificadas durante a implementação e as potenciais melhorias, oferecendo uma perspectiva sobre o impacto prático das soluções propostas para a viabilização de sistemas energéticos distribuídos e sustentáveis.

## 2 MICRO REDE (uR)

Neste capítulo, será detalhado o conceito de uR, abordando suas principais características e vantagens no cenário energético contemporâneo. Inicialmente, o conceito de uR será explorado, destacando sua capacidade de promover um fluxo de energia bidirecional, integrando unidades de GD e possibilitando que consumidores se tornem autoprodutores de energia, com a possibilidade de enviar o excedente à rede pública (Casarin, 2019). Em seguida, será discutida a evolução para uR híbridas, que combinam diferentes fontes de energia renováveis e sistemas de armazenamento para proporcionar maior flexibilidade e resiliência operacional. Por fim, o capítulo examinará diversas arquiteturas de uR, com foco na integração de fontes renováveis e tecnologias de armazenamento, apresentando exemplos de projetos ao redor do mundo que ilustram as inovações e desafios na implementação dessas soluções sustentáveis.

### 2.1 CONCEITO

Como uma uR é composta por uma série de unidades de geração distribuída interconectadas à rede pública por meio de dispositivos eletrônicos de potência, conforme descrito por Mariam *et al.* (2013). Diferente da rede de distribuição convencional, onde o fluxo de energia ocorre de forma unidirecional, da subestação para a carga, as uR s promovem um fluxo bidirecional. Isso se dá devido à crescente tendência de consumidores que se tornam autoprodutores de energia, permitindo que a energia gerada em excesso seja enviada de volta para a rede pública. Essa mudança na dinâmica da rede exige aprimoramentos no controle, proteção, estabilidade e confiabilidade, de modo a integrar eficientemente as uR s ao sistema elétrico convencional.

Com o aumento da popularidade dos Recursos Energéticos Renováveis (RER), como a infraestrutura para energia solar e eólica, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para maximizar seu potencial, resultando em soluções como a GD, uR s baseadas em RERs e Sistemas de Armazenamento de Energia, do inglês Energy Storage Systems (ESS). Embora essas inovações tragam benefícios significativos, problemas relacionados à proteção, controle e qualidade de energia podem surgir se

a integração entre as uRs e o sistema elétrico não for devidamente projetada. Por exemplo, sistemas fotovoltaicos, que convertem a luz solar em energia elétrica, precisam de inversores e, assim, permitindo que o excedente de energia seja fornecido à concessionária (Saeed *et al.* 2021). A correta configuração desses sistemas é essencial para garantir a compensação de crédito, conforme a figura 5:

Figura 5 - Configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: Rosa, 2017, *online*.

A quantidade de energia elétrica consumida é medida por um dispositivo chamado medidor de energia. Finalmente, a energia em excesso é entregue a concessionária de energia elétrica que realiza as operações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

A GD contribui para o suporte de tensão local e aumenta a confiabilidade global da rede elétrica (Graosquel; Dias, 2018). A implementação de uma uR apresenta-se como uma solução viável para maximizar as vantagens da GD, superando as limitações associadas à alta penetração. Através da utilização de recursos de geração de alta eficiência energética e da integração de fontes de energia renováveis, é possível alcançar benefícios ambientais significativos. Adicionalmente, as uR têm o potencial de minimizar as perdas de transmissão e distribuição, postergar os investimentos substanciais necessários para a atualização da infraestrutura de rede e diminuir a necessidade de reservas de geração centralizada (Casarin, 2019). Portanto, a adoção de uRs representa uma estratégia eficaz para a otimização do sistema de energia, promovendo a sustentabilidade e a resiliência da rede.

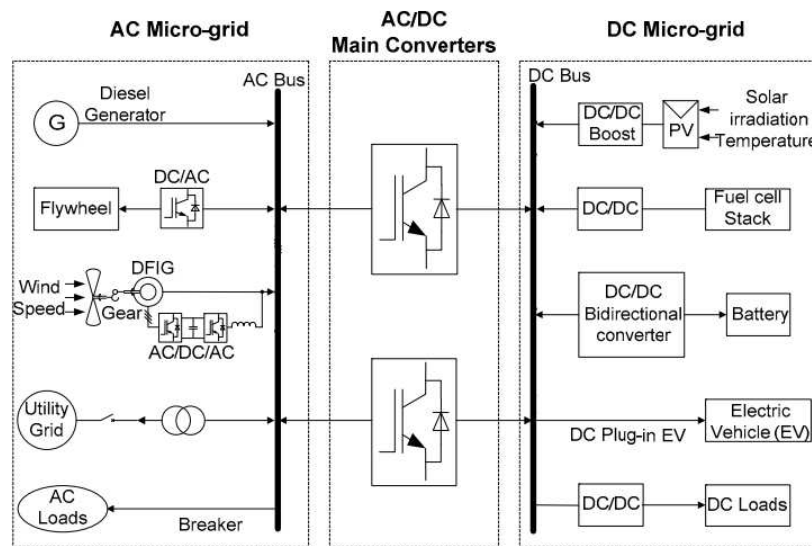
A transição para uRs híbridas é uma evolução importante para sistemas de energia mais eficientes e sustentáveis. Essas redes combinam fontes renováveis com tecnologias tradicionais e sistemas de armazenamento, proporcionando maior flexibilidade e resiliência.

## 2.2 MICROREDE HÍBRIDA

Nas últimas décadas, a hibridização de diversas fontes de energia renováveis tem sido amplamente debatida, culminando em várias iniciativas concretas em implementação. Essas soluções integram diferentes fontes de geração de energia e/ou sistemas de armazenamento, proporcionando uma maior flexibilidade operacional, além de possibilitar uma significativa redução de custos (Silva; Pradelle, 2019).

A Figura 6 apresenta um diagrama de um sistema híbrido de uma uR híbrida. No lado esquerdo do diagrama, observa-se a uR em CA, que inclui um gerador a diesel, um gerador eólico, uma rede de distribuição pública e cargas CA conectadas a um barramento de corrente alternada. Um destaque nesse sistema é o *Double Fed Induction Generator* (DFIG), um gerador de indução duplamente alimentado, que se conecta ao barramento CA por meio de um conversor que realiza a conversão entre corrente alternada e corrente contínua (CA/CC), otimizando a eficiência energética da operação.

Figura 6 - A hybrid AC DC micro-grid system.



Fonte: Wang *et al.* 2022.

No centro do diagrama, os conversores principais realizam a conversão de energia entre a UR de corrente alternada e a de corrente contínua (CC). À direita, a UR de corrente contínua possui módulos fotovoltaicos, uma célula de combustível, uma bateria e um veículo elétrico (EV), todos conectados ao barramento CC por meio de conversores bidirecionais. As cargas CC estão diretamente ligadas ao barramento. Essa configuração exemplifica uma UR híbrida, onde diferentes fontes de energia e cargas são integradas.

### 2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O projeto Aichi, no Japão, desenvolvido como parte de uma iniciativa da New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), apresenta uma microrede composta por diferentes fontes de energia e sistemas de armazenamento. Esta microrede integra uma célula de combustível de óxido sólido (SOFC) de 25 kW, além de quatro células de combustível de ácido fosfórico (PAFC) com capacidade de 200 kW cada. Um sistema fotovoltaico de 330 kW também faz parte do projeto, juntamente com um sistema de armazenamento de baterias de sódio-enxofre (NaS), que é fundamental para a gestão da energia gerada. Além disso, a microrede conta com duas células de combustível de carbonato fundido (MCFC), com potências de

270 kW e 300 kW, que utilizam biogás como fonte de combustível. Todo esse conjunto é integrado por conversores que permitem a operação eficiente e flexível do sistema (Lidula; Rajapakse, 2011).

No Reino Unido, a Universidade de Manchester desenvolveu um protótipo de microrede em laboratório que utiliza um sistema de armazenamento de energia FES (Flywheel Energy Storage). Este sistema é composto por um gerador síncrono e um motor de indução, ambos acoplados para funcionar como fonte de energia. A energia armazenada é gerida por um FES, que está conectado por meio de um inversor, garantindo a estabilidade do fornecimento energético. A implementação deste protótipo visa explorar soluções eficientes de armazenamento e fornecimento de energia, destacando a importância da integração de diferentes tecnologias em microredes experimentais.

Na Alemanha, a microrede DeMoTec é composta por uma configuração híbrida de fontes de energia, incluindo dois geradores a diesel, um gerador fotovoltaico (PV), um gerador eólico e duas unidades de baterias. O gerador fotovoltaico, com capacidade de 2 kW, está conectado a uma das baterias, enquanto a outra unidade de 10 kW está vinculada à carga protegida, responsável por fornecer energia a pequenas empresas. O sistema é apoiado pelos geradores a diesel, com capacidades de 10 kW e 16 kW, que fornecem energia adicional ou de reserva quando necessário. O gerador eólico de 15 kW também contribui para a oferta de energia, o que garante maior resiliência ao sistema, especialmente em momentos de baixa geração solar (Lidula; Rajapakse, 2011).

Em Hong Kong, foi proposta uma microrede para alimentar uma ilha remota utilizando uma combinação de energia solar e eólica, em conjunto com um sistema de armazenamento hidrelétrico bombeado (PHS). Neste sistema, o excesso de energia gerado pelas fontes renováveis é utilizado para bombear água para um reservatório superior, que serve como fonte de energia armazenada. Este armazenamento é aproveitado durante períodos de baixa geração, garantindo a continuidade no fornecimento. O estudo demonstrou a viabilidade técnica e econômica dessa abordagem híbrida para regiões isoladas, destacando a relevância do PHS no contexto de microredes autossuficientes (Ma et al., 2014).

Outro exemplo significativo é a arquitetura de uma microrede que integra diversas fontes de energia, incluindo módulos fotovoltaicos, um sistema de biomassa



e turbinas eólicas. Estas fontes são conectadas a um barramento CA, que distribui a energia gerada. O sistema conta também com uma bateria que armazena o excedente de energia gerada, permitindo o fornecimento durante períodos de baixa geração, e um gerador a diesel que serve como backup. A carga conectada ao sistema, que pode representar uma residência ou uma pequena comunidade, é abastecida por essas fontes, garantindo um fornecimento estável e eficiente (Kharrich et al., 2020).

Em um estudo sobre um sistema híbrido fotovoltaico e gerador a diesel, complementado por armazenamento hidrelétrico bombeado (PHS), foi observada uma melhoria operacional significativa. O sistema utiliza o excesso de energia fotovoltaica para bombear água para um reservatório, que pode ser utilizado para gerar eletricidade durante períodos de baixa produção solar, reduzindo o consumo de diesel. Essa abordagem tem como objetivo otimizar o uso de recursos renováveis e minimizar a dependência de combustíveis fósseis (Makhdoomi; Askarzadeh, 2020).

Em outro exemplo, o projeto de uma microrede híbrida renovável na ilha do Faial, arquipélago dos Açores, buscou otimizar o design do sistema energético para atender às demandas locais. A microrede é composta por turbinas eólicas, uma usina geotérmica e módulos fotovoltaicos, além de motores a diesel que atuam como geradores de *backup*. A energia excedente gerada pelos sistemas renováveis é armazenada em baterias de íons de lítio (Li-Ion), que garantem uma resposta rápida às variações de demanda e fornecimento. O sistema opera em um barramento de corrente alternada (CA), que interliga as diferentes fontes de energia e gerencia a distribuição para as cargas conectadas. Um retificador também foi implementado para permitir o armazenamento do excesso de produção nas baterias (Barbaro; Castro, 2020).

Na região de Yanbu, na Arábia Saudita, foi projetada uma microrede híbrida fotovoltaica e biomassa com o objetivo de otimizar os custos do sistema, medidos pelo custo presente líquido (NPC) e pelo custo nivelado de energia (LCOE). O estudo revisou diferentes configurações de sistemas híbridos e ferramentas de otimização, concentrando-se principalmente em duas topologias: fotovoltaica e biomassa, e fotovoltaica, eólica e diesel com baterias. A análise concluiu que sistemas híbridos isolados, como o proposto para Yanbu, são economicamente viáveis e proporcionam uma solução sustentável para o fornecimento de energia em regiões remotas (Kharrich et al., 2020).

Por fim, em NEOM, também na Arábia Saudita, foi analisado um sistema híbrido fotovoltaico com células de combustível e baterias, projetado para atender a uma pequena comunidade. O sistema inclui um arranjo fotovoltaico de 200 kW, uma célula de combustível de 40 kW, 96 baterias, além de conversores e um eletrolisador de 110 kW, que armazena hidrogênio em um tanque de 50 kg. O estudo mostrou que essa configuração é mais viável tanto econômica quanto ambientalmente, quando comparada à extensão da rede elétrica ou à utilização de geradores a diesel (Rezk; Kanagaraj; Al-Dhaifallah, 2020).

### 3 RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

A incorporação dos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) ao modelo atual de geração e consumo de energia representa uma oportunidade significativa para expandir o acesso à eletricidade e contribuir para a descarbonização. No entanto, essa integração exige mais do que simples avanços tecnológicos ou financeiros. Ela demanda uma reavaliação do modelo vigente e da atuação dos diversos agentes do setor elétrico. Os RED's, que abrangem tecnologias de geração e armazenamento de energia, como medidores bidirecionais, inversores, sistemas de armazenamento e redes inteligentes, têm a capacidade de transformar tanto a oferta quanto a demanda de energia, promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos (Gouvêa, 2019).

Essa evolução também enfrenta obstáculos, especialmente no que diz respeito à ampliação das fontes renováveis, muitas vezes atrelados ao crescimento dos RED's. A implementação desses recursos pode introduzir avanços tecnológicos e serviços mais modernos de distribuição de energia, com impacto positivo tanto em áreas urbanas quanto em regiões remotas e rurais. Além disso, há uma tendência crescente de transformar os consumidores em produtores de energia, o que ressalta a necessidade de um planejamento mais abrangente e estratégico para integrar de forma eficiente os RED's ao sistema elétrico (Gouvêa, 2019).

Este capítulo aborda a incorporação e o desenvolvimento de RED, explorando suas diversas fontes e tecnologias. Primeiramente, serão discutidas as principais fontes de energia renovável, como a hidrelétrica, geotérmica, biomassa, solar e eólica.

Além das fontes de energia, o capítulo explora os conversores e suas tecnologias, fundamentais para a transformação e adequação da energia gerada. Serão apresentados os tipos de conversores, como os CC-CC (corrente contínua para contínua) e os CC-AC (corrente contínua para alternada), e suas aplicações em diferentes contextos energéticos. Finalmente, serão discutidos os sistemas de armazenamento de energia, incluindo tecnologias inovadoras como *flywheels* (volantes de inércia), supercapacitores, baterias, células de combustível de hidrogênio e armazenamento de energia em ar comprimido e hidrelétrico bombeado. Esses sistemas são uma fração do que compõe uma uR estável e robusta e a eficiência de redes mais amplas, promovendo uma gestão energética mais sustentável e resiliente.

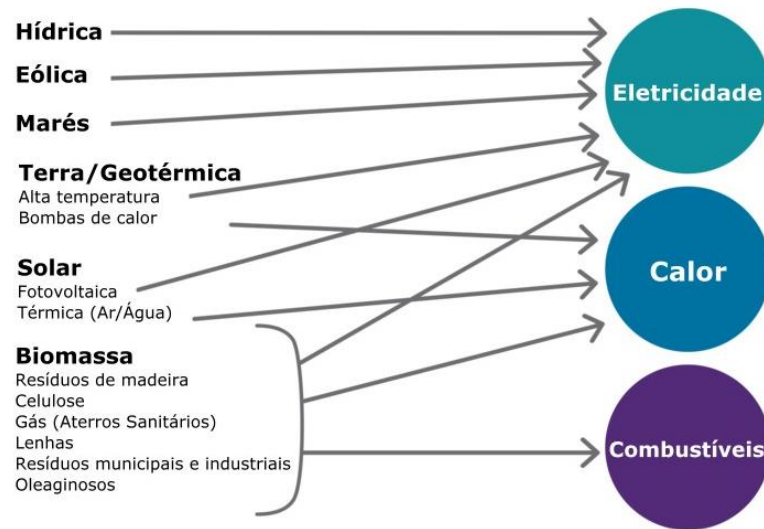
### 3.1 FONTES

A energia disponível na Terra provém de diversas fontes primárias, sendo gerada por processos naturais distintos. Primeiramente, a fissão nuclear que ocorre no interior do planeta é responsável pela energia geotérmica, enquanto a fusão nuclear no Sol libera fótons que chegam à Terra como radiação eletromagnética, ou seja, luz solar. Ao atingir superfícies terrestres, essa luz se transforma em calor; parte dele é absorvida pelos materiais e parte é refletida de volta para o espaço (Oliveira, 2022).

Adicionalmente, uma pequena fração da luz solar é convertida em biomassa por meio da fotossíntese. O calor gerado pela luz desempenha um papel essencial no ciclo hidrológico, ao criar ventos e evaporar a água, que se desloca para áreas mais elevadas e forma rios. Fontes fósseis, como petróleo, gás natural e carvão mineral, também são originadas de biomassa acumulada em eras geológicas passadas, enquanto minerais energéticos, como o urânio, são extraídos para serem utilizados em diversos métodos de geração de energia (Oliveira, 2022).

Essas fontes primárias podem ser agrupadas em renováveis e não renováveis. As renováveis, como o sol e o vento, são inesgotáveis e se renovam naturalmente, enquanto as não renováveis, como o petróleo e o carvão, são finitas e limitadas. As fontes secundárias de energia, por outro lado, são aquelas que resultam da transformação das primárias. Exemplos incluem a eletricidade, a gasolina e o hidrogênio. Assim, fontes como a energia hídrica, eólica, maremotriz, geotérmica, solar e biomassa podem ser convertidas em eletricidade; já a energia geotérmica, solar e biomassa podem ser transformadas em calor; e a biomassa pode ainda ser convertida em combustíveis, como demonstra a Figura 7 (Anhalt, 2013).

Figura 7 - Origem de fontes primárias renováveis e Transformações Energéticas.



Fonte: Reis, 2020, *online*.

Após compreender as diferentes origens e processos de geração das fontes primárias de energia, é importante aprofundar a análise sobre as fontes renováveis. Essas fontes, como será discutido a seguir, destacam-se pela capacidade de se regenerarem naturalmente e pela menor emissão de poluentes, contribuindo para um futuro energético mais sustentável.

### 3.1.1 Fonte Energética Renovável

As fontes renováveis de energia têm sua origem em quatro tipos fundamentais de energia presentes na natureza. Primeiramente, a energia cinética, que está relacionada ao movimento dos corpos, como ocorre com o vento que movimenta turbinas eólicas. Em seguida, a energia potencial, que depende da gravidade e pode ser observada, por exemplo, na força das águas represadas utilizadas nas usinas hidrelétricas. Há também a energia eletromagnética, que resulta das interações entre partículas atômicas (Tibola, 2009).

Essas formas de energia primária interagem com o ambiente e dão origem a outras manifestações de energia que encontramos na Terra, como a hidráulica, solar, nuclear e eólica. Através de processos de transformação tecnológica, essas energias são convertidas em energias secundárias, que são aquelas que usamos diretamente

no nosso dia a dia. A energia mecânica de rotação, utilizada em motores, e a energia elétrica, que alimenta uma vasta gama de dispositivos e sistemas, são exemplos dessas energias secundárias (Tibola, 2009).

No contexto brasileiro, algumas fontes renováveis se destacam pela sua relevância e potencial de crescimento. A energia hidrelétrica, que aproveita a força das águas, é a principal fonte de energia no país, enquanto a energia eólica vem ganhando espaço pela sua eficiência em áreas com ventos constantes. A energia geotérmica, embora menos explorada, representa uma alternativa sustentável em regiões específicas. Já a energia solar, tanto em sua forma térmica quanto fotovoltaica, tem crescido significativamente devido ao clima favorável em muitas partes do Brasil. Por fim, a biomassa, que envolve a utilização de matéria orgânica para geração de energia, também desempenha um papel importante na matriz energética, contribuindo para um sistema mais diversificado e sustentável

Nos próximos tópicos, serão detalhadas algumas das fontes de energia renovável mencionadas, explorando suas características, vantagens e o papel que desempenham no cenário energético atual. A análise incluirá desde a energia hidrelétrica e eólica, amplamente utilizadas no Brasil, até alternativas como a geotérmica, solar e biomassa, que vêm ganhando espaço na busca por soluções energéticas mais sustentáveis e eficientes.

### *3.1.1.1 Fonte hidrelétrica*

A geração de energia hidrelétrica ocorre através do aproveitamento da energia potencial gravitacional da água acumulada em uma represa elevada. Esse processo começa quando a água, ao ser liberada, é convertida em energia cinética ao movimentar as pás de uma turbina hidráulica, que, por sua vez, aciona um gerador responsável por transformar essa energia mecânica em eletricidade. A construção de uma usina hidrelétrica envolve a edificação de uma barragem, cuja função é represar o fluxo do rio, formando um reservatório artificial. Esse lago não apenas armazena água, mas também cria o desnível necessário para permitir que a água caia e movimente as turbinas com força adequada. Um exemplo notável dessa tecnologia é a Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada em Foz do Iguaçu, Paraná, que se destaca

por ser uma instalação binacional, operada em parceria entre Brasil e Paraguai (Villalva, 2012).

### *3.1.1.2 Fonte Geotérmica*

A energia geotérmica, conforme descrito pelo European Geothermal Energy Council (EGEC), é gerada pelo calor retido abaixo da superfície terrestre e pode provir de diversas fontes, incluindo o calor do interior da Terra, radiação solar, movimento de águas subterrâneas e energia térmica presente no solo. No entanto, fontes de média e alta temperatura são relativamente raras, o que exige o desenvolvimento de tecnologias específicas para aproveitar as fontes de baixa temperatura (Mohammadi et al. 2020).

De acordo com Omido, Barboza e Moreira Júnior (2017), a energia geotérmica é classificada em três categorias principais, baseadas na temperatura de extração, ou entalpia. Essas categorias são: alta entalpia, com temperaturas acima de 150 °C, utilizada na geração de energia elétrica; média entalpia, variando entre 90 °C e 150 °C, aplicada em processos industriais; e baixa entalpia, com temperaturas entre 30 °C e 90 °C, usada em aplicações agrícolas. Além dessas, há também a classificação de muito baixa entalpia, para temperaturas inferiores a 30 °C, frequentemente utilizada para fins residenciais.

No caso das aplicações de baixa e muito baixa entalpia, a abordagem se baseia na estabilidade da temperatura do solo a determinadas profundidades, que tende a permanecer próxima à média anual da região. Assim, durante o verão, a temperatura do solo é mais baixa do que na superfície, enquanto no inverno ela é mais alta. Dessa forma, no verão, o sistema de refrigeração pode transferir o calor do interior dos edifícios para o solo, ajudando a resfriar o ambiente interno. Já no inverno, o sistema retira calor do solo e o transfere para dentro do edifício, contribuindo para o aquecimento. Essa tecnologia permite regular a temperatura de edificações de maneira eficiente, reduzindo a necessidade de consumo de energia elétrica para aquecimento e refrigeração convencionais (Omido; Barboza; Moreira Júnior, 2017).

### *3.1.1.3 Fonte por biomassa*

No Brasil, a biomassa desempenha um papel importante na transição energética, servindo como uma importante fonte primária que pode ser convertida em diferentes formas de energia secundária. Entre as categorias de biomassa, destacam-se a florestal, agrícola e os resíduos urbanos e industriais. A biomassa florestal compreende principalmente lenha e carvão vegetal, que ainda são amplamente utilizados como combustíveis em diversas regiões do país. Já a biomassa agrícola tem como principal representante a cana-de-açúcar, que se destaca na produção de etanol, um biocombustível de baixa emissão de carbono que contribui para a redução dos impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis (Silva *et. al.* 2015).

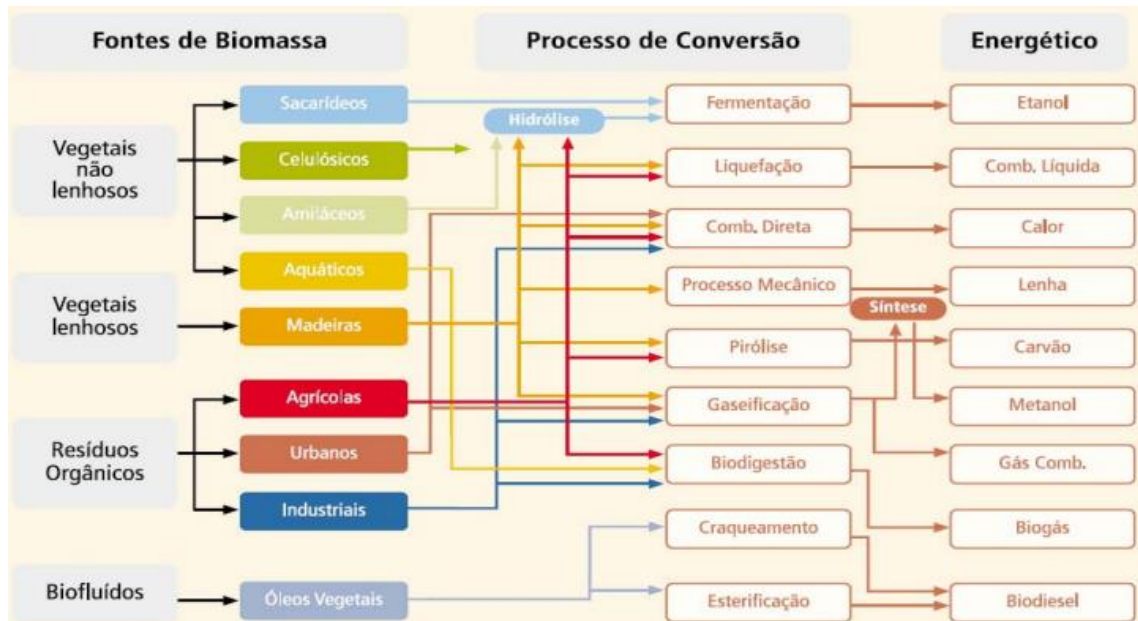
Além disso, resíduos urbanos e industriais apresentam grande potencial energético, pois podem ser convertidos em biogás através de processos de digestão anaeróbica, oferecendo uma alternativa sustentável para o tratamento de rejeitos e a geração de energia limpa. O potencial energético da biomassa depende diretamente do poder calorífico de cada tipo de matéria-prima, sendo essencial considerar essa variável para otimizar a produção de energia (Silva *et. al.* 2015).

Para transformar a biomassa em energia elétrica ou outros produtos energéticos, são empregados diferentes sistemas de conversão. Esses sistemas podem ser classificados em processos termoquímicos, que envolvem a combustão, gaseificação e pirólise; processos bioquímicos, como a fermentação e digestão anaeróbica; e processos físico-químicos, que incluem a extração de óleos vegetais e a produção de biocombustíveis (Silva *et. al.* 2015).

As principais etapas desses processos e os sistemas de conversão aplicados podem ser observados na Figura 8 e na Figura 9, respectivamente, que ilustram o processo de conversão da biomassa e os sistemas de conversão de biomassa. A diversidade de técnicas e abordagens para aproveitar o potencial energético da biomassa no Brasil.



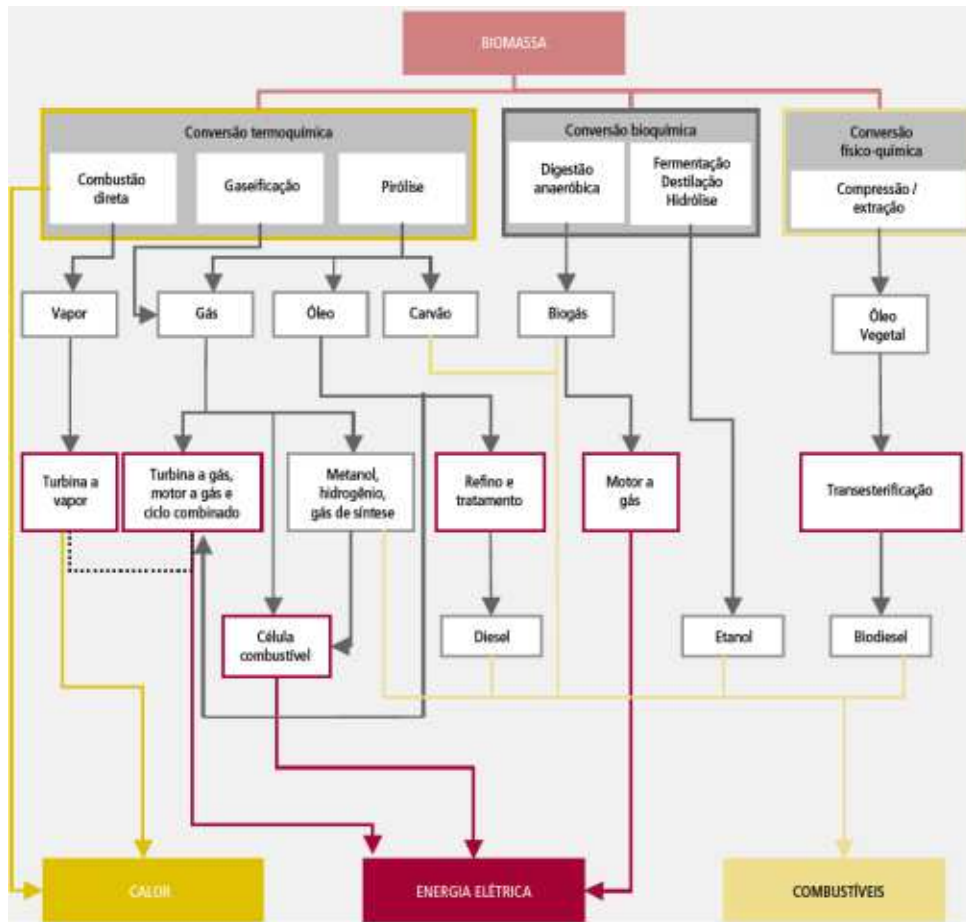
Figura 8 - Processos de conversão da Biomassa.



Fonte: Morello *et. al.* 2020, online.

A figura 8 apresenta uma visão detalhada das fontes de biomassa e seus processos de conversão, dividindo as fontes em categorias como vegetais não lenhosos, vegetais lenhosos, resíduos orgânicos e biofluidos. O diagrama mostra como cada uma dessas fontes pode passar por diferentes processos, como fermentação, liquefação e pirólise, para gerar diversos tipos de energia, incluindo etanol, calor e biogás. A abordagem permite entender a versatilidade das fontes de biomassa e a variedade de produtos energéticos que podem ser obtidos através de diferentes tecnologias de conversão.

Figura 9 - Sistemas de conversão de Biomassa.



Fonte: Morello *et. al.* 2020, online.

Já a figura 9, por sua vez, foca nos principais processos de conversão de biomassa, classificando-os em termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos. Ela destaca como cada processo resulta em diferentes produtos, que podem ser usados para gerar calor, energia elétrica ou combustíveis. O diagrama também ilustra o fluxo desses processos, desde a matéria-prima até a aplicação final, o que ajuda a visualizar as etapas necessárias para transformar biomassa em formas utilizáveis de energia. Além disso, destaca tecnologias específicas, como turbinas a vapor e motores a gás, que são essenciais para a conversão final da energia.

#### 3.1.1.4 Fonte solar térmica

A energia solar térmica é um campo que abrange uma ampla variedade de tecnologias e dispositivos projetados para capturar, converter e utilizar a energia do

sol na forma de calor. Esses sistemas são essenciais para transformar a radiação solar em energia térmica, que pode ser empregada para diferentes finalidades, como aquecimento de água, climatização de ambientes e até mesmo geração de eletricidade. Existem dois tipos principais de coletores solares térmicos: os coletores não concentradores e os coletores concentradores (Macedo et al. 2019).

Os coletores não concentradores, como o coletor de placa plana, capturam a radiação solar de maneira direta, sem a necessidade de concentrá-la em um ponto específico. Essa simplicidade de *design* torna esses dispositivos ideais para aplicações de baixa temperatura, como o aquecimento de água para uso doméstico e comercial. Em sistemas residenciais, são amplamente utilizados devido à sua eficiência e custo-benefício (Macedo et al. 2019). A Figura 10 ilustra um exemplo típico de coletores solares instalados no telhado de uma residência:

Figura 10 - Coletores solares térmicos instalados no telhado de uma residência



Fonte: Macedo *et al.* 2019, p. 8.

Por outro lado, os coletores concentradores são projetados para intensificar a radiação solar, focalizando-a em um ponto ou linha de foco específico, o que permite atingir temperaturas muito mais altas. Essa concentração de energia térmica é utilizada principalmente em aplicações industriais e de geração de eletricidade. Um exemplo notável é a Torre Solar, como mostra a Figura 11, que concentra a luz solar refletida por uma série de espelhos em um receptor central, aquecendo um fluido que gera vapor diretamente, acionando turbinas para a produção de eletricidade.

Figura 11 - Torre Central e heliostatos



Fonte: Braga; Lisboa, 2010, p. 3.

De acordo com Mohammadi et al. (2020), existem diversas configurações possíveis para esses sistemas de coleta solar, permitindo que sejam integrados a outras fontes de energia em sistemas híbridos de multigeração. Essa flexibilidade possibilita uma utilização mais eficiente e diversificada da energia térmica solar. A escolha da configuração ideal depende de uma análise cuidadosa que leve em consideração fatores termodinâmicos, econômicos e ambientais, assegurando que o sistema seja eficiente e sustentável.

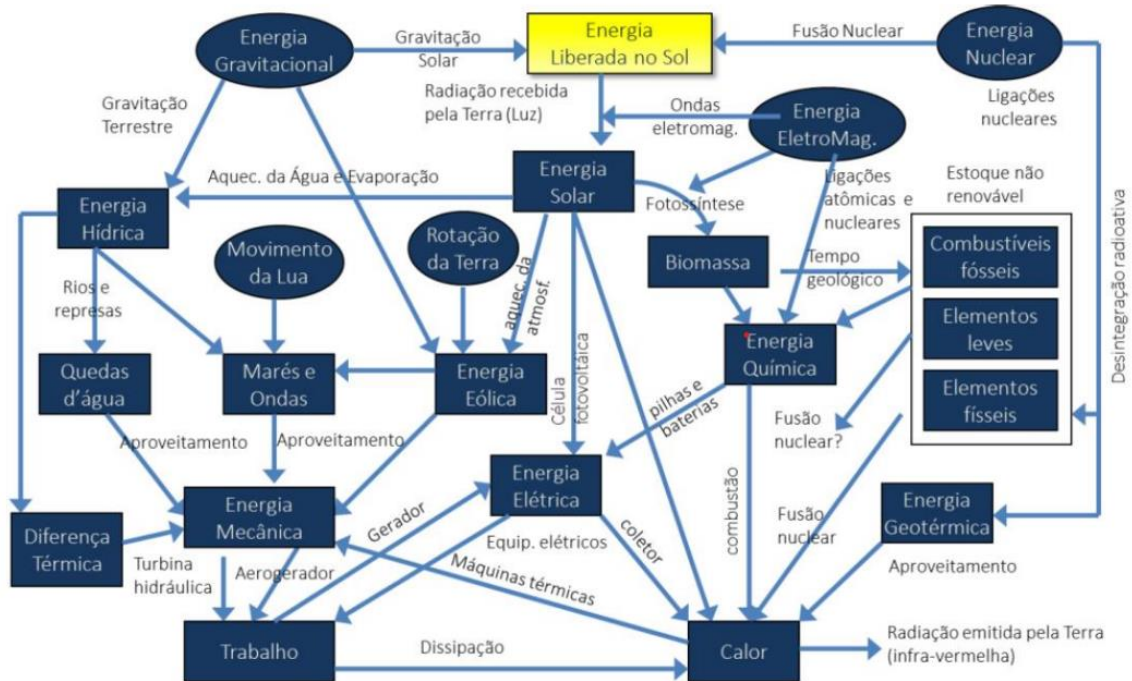
#### 3.1.1.5 Fonte solar

A energia solar resulta do processo de fusão nuclear do hidrogênio no núcleo do Sol, um fenômeno desencadeado por temperaturas e densidades extremamente elevadas. Durante essa fusão, uma imensa quantidade de energia é liberada, enquanto o hélio é gerado como subproduto. Essa energia solar desempenha um papel fundamental na evaporação da água, alimentando o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, sustentando a geração de energia hidrelétrica.

A distribuição desigual da radiação solar na superfície terrestre provoca variações térmicas, gerando diferenças de pressão que impulsionam o movimento das massas de ar, transformando a energia térmica em energia cinética. É importante destacar que, mesmo os combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, são formas de energia solar acumulada ao longo de milhões de anos. A Figura 12 ilustra as diversas transformações e origens energéticas derivadas da radiação solar,

demonstrando como essa fonte primária de energia é convertida e utilizada de diferentes formas na Terra.

Figura 12 - Origem e Transformações Energéticas da Radiação Solar.



Fonte: Castellano, 2018, *online*.

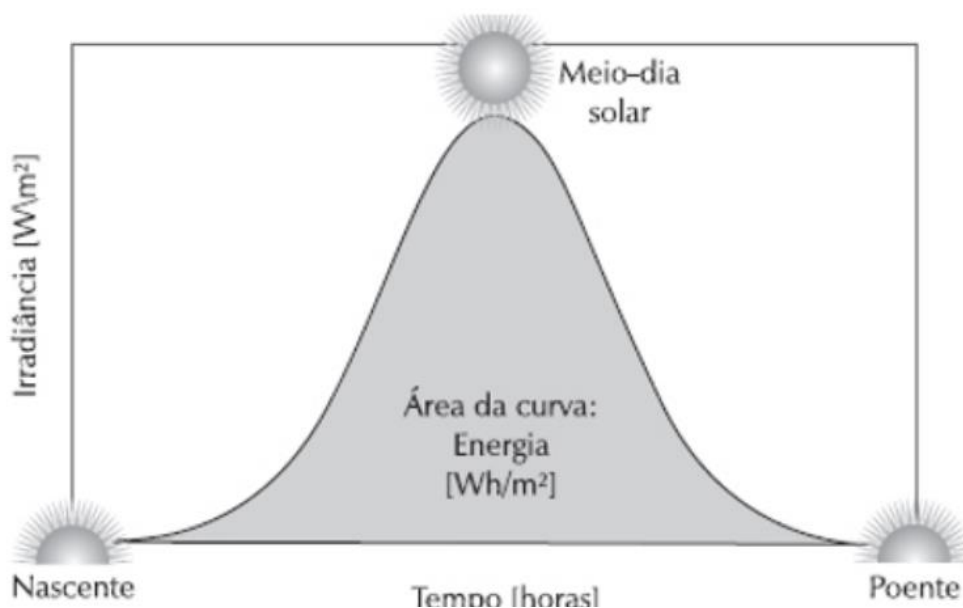
A imagem destaca como a energia proveniente do Sol é fundamental para diversos fenômenos naturais e processos energéticos, como a evaporação da água, que sustenta o ciclo hidrológico, e a geração dos ventos, resultante das variações na distribuição de calor pela superfície terrestre.

Para compreender o conceito de irradiação, é fundamental entender a radiação, que se refere ao processo de transmissão de energia através do espaço. Esse processo pode ocorrer na forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas subatômicas. A radiação eletromagnética abrange uma ampla gama de ondas, incluindo ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama. Por outro lado, a radiação de partículas engloba elétrons, prótons, nêutrons e outras partículas subatômicas. Esse fenômeno natural está presente em todo o universo e desempenha um papel crucial em diversas áreas da ciência, como física, química, biologia e medicina (Martins et al., 2017).

A terminologia empregada no atlas do INPE distingue diferentes tipos de irradiância. A irradiância extraterrestre ( $G_0$ ) é a taxa de energia incidente por unidade de área sobre um plano horizontal imaginário localizado no topo da atmosfera. A irradiância direta normal ( $G_n$ ) representa a taxa de energia por unidade de área que incide perpendicularmente à superfície, diretamente do Sol. Já a irradiância difusa horizontal ( $G_{dif}$ ) corresponde à taxa de energia que incide sobre uma superfície horizontal, resultante do espalhamento da radiação solar direta pelos componentes atmosféricos. A irradiância direta horizontal ( $G_{dir}$ ) refere-se à taxa de energia do feixe solar direto que chega a uma superfície horizontal. A irradiância global horizontal ( $G$ ) combina a energia total recebida por unidade de área em uma superfície horizontal, enquanto a irradiância no plano inclinado ( $G_i$ ) é a taxa de energia total que incide em um plano inclinado, ajustado de acordo com a latitude local em relação à superfície terrestre (Martins et al., 2017).

Ao chegar à superfície terrestre, a radiação solar pode ser captada de múltiplas direções, pois, ao atravessar a atmosfera, parte da radiação é absorvida, espalhada ou refletida por moléculas de ar e partículas em suspensão, como poeira. A irradiação é a medida que quantifica essa energia radiante que atinge uma superfície, considerando a energia acumulada durante um determinado intervalo de tempo por unidade de área (Casarin, 2019).

Figura 13 - Perfil da irradiância solar ao longo de um dia.



Fonte: Casarin, 2019, p. 34.



A irradiação é determinada pela integração dos valores de irradiância ao longo do tempo, correspondendo à área sob a curva que representa a irradiância durante o dia. Esse cálculo fornece a quantidade total de energia solar recebida por unidade de área ao longo de um determinado período. A irradiância, por sua vez, é a grandeza física usada para medir a intensidade da radiação solar, expressa em watts por metro quadrado  $W/m^2$ , na superfície terrestre, os valores típicos de irradiância costumam atingir cerca de  $1000 W/m^2$  (Casarin, 2019). Para compreensão da irradiação, faz-se necessário o entendimento da radiação, a qual é um processo de transmissão de energia através do espaço, que pode ocorrer na forma de ondas eletromagnéticas ou partículas subatômicas. A radiação eletromagnética inclui ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama. Já a radiação de partículas inclui elétrons, prótons, nêutrons e outras partículas subatômicas. A radiação é um fenômeno natural que ocorre em todo o universo e é importante em muitas áreas da ciência, incluindo física, química, biologia e medicina.

Entretanto, em um dado ponto na superfície do solo é possível captar raios solares vindos de todas as direções. Durante sua passagem pela atmosfera, a radiação é absorvida, espalhada e refletida devido a moléculas de ar e outras partículas como poeira. A irradiação é a grandeza utilizada para quantificar a energia radiante que incide em uma superfície durante um certo intervalo de tempo por unidade de área (Casarin, 2019).

### *3.1.1.6 Fonte Fotovoltaica*

O termo fotovoltaico é originário do grego Phos, que significa luz, e Volt, que por sua vez vem do sobrenome do físico italiano Alessandro Volta, inventor da pilha. O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839. Alexandre Edmond Becquerel, nascido e falecido em Paris, foi um renomado cientista francês conhecido por seus estudos em óptica, magnetismo e espectroscopia. Em 1839, ele desenvolveu um dispositivo fotovoltaico. Neste experimento, ele usou cloreto de prata ou brometo de prata para revestir os

eletrodos de platina; uma vez que os eletrodos foram iluminados, a voltagem e a corrente foram geradas (Casarin, 2019).

Os sistemas fotovoltaicos podem operar de forma isolada (off-grid) ou conectada à rede (on-grid). Os sistemas isolados necessitam de sistemas de armazenamento para garantir o fornecimento contínuo de energia durante períodos de indisponibilidade dos recursos renováveis, sendo também fundamentais na definição de estratégias para a operação ótima do sistema (Jimena, 2019). Nesses sistemas, a energia gerada pelos painéis em corrente contínua (CC) é armazenada em baterias, reguladas por controladores de carga e convertida para corrente alternada (CA) por inversores. Por outro lado, sistemas fotovoltaicos conectados à rede (on-grid) são compostos por painéis fotovoltaicos que produzem energia elétrica em corrente contínua (CC), inversores que convertem essa corrente para alternada (CA), dispositivos de proteção e medidores de energia (Besso, 2017).

Em setembro de 1997, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis, marcou um importante avanço no campo da energia renovável ao inaugurar a primeira instalação de energia solar fotovoltaica integrada a uma edificação urbana e conectada à rede elétrica pública no Brasil. Essa instalação pioneira foi implementada no bloco A do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, com uma capacidade instalada de 2.078 Wp, distribuída em 68 módulos fotovoltaicos, como ilustrado na Figura 14. O projeto representou um marco na aplicação de tecnologias fotovoltaicas em ambientes urbanos, contribuindo para o desenvolvimento e a difusão desse tipo de energia no país (Casarin, 2019).



Figura 14 - Primeira instalação fotovoltaica conectada à rede elétrica no Brasil Fonte.

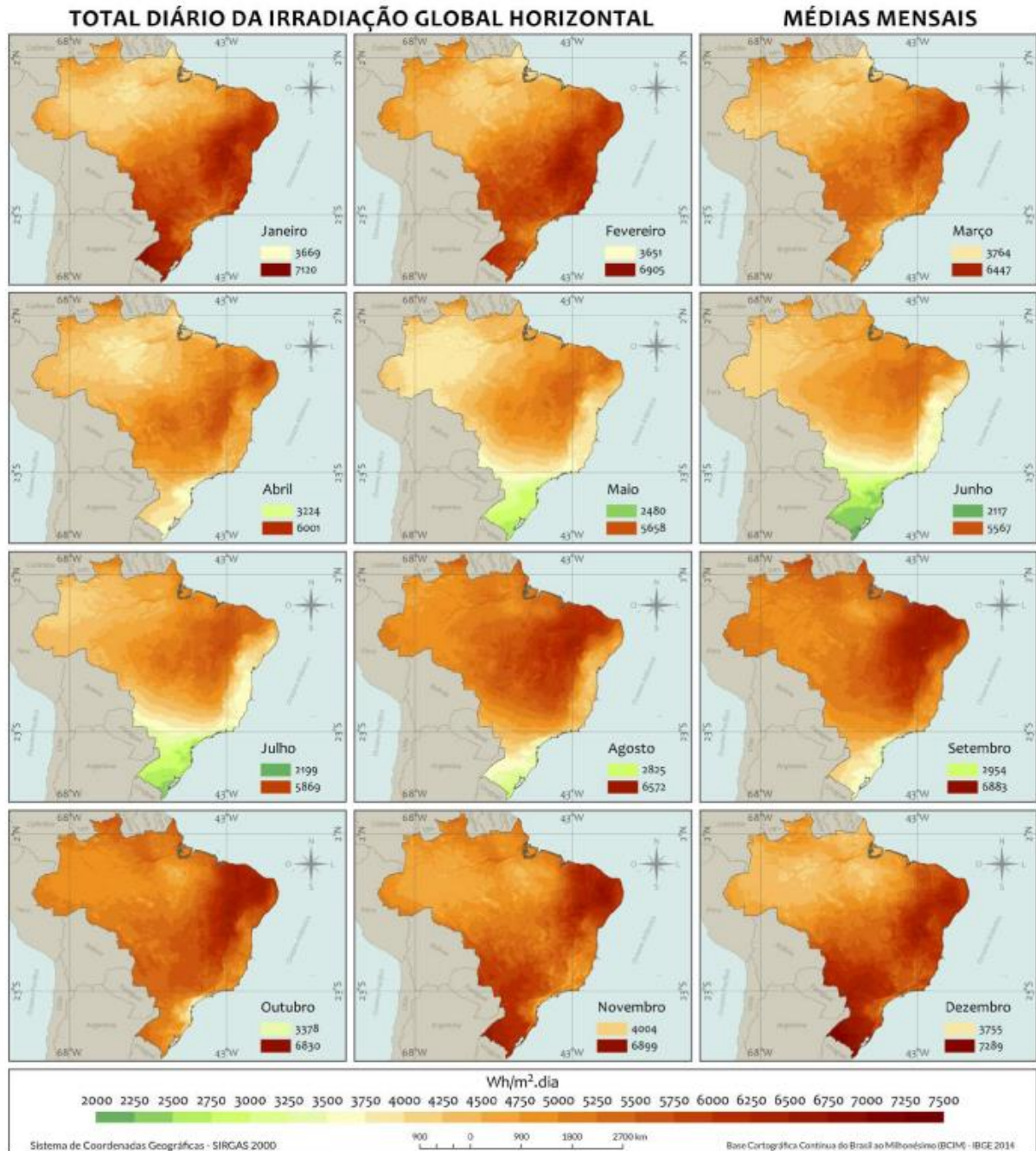


Fonte: Casarin, 2019.

O sistema de compensação de energia elétrica implantado no Brasil possibilita aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede que uma unidade consumidora que gere mais energia elétrica do que consome, em um dado momento, exporte esse excedente para a rede elétrica e o utilize em horários em que o sistema fotovoltaico não esteja operando, como durante a noite. Dessa forma, tanto os créditos exportados para a rede, quanto a energia consumida da rede, são contabilizados.

A fonte solar fotovoltaica apresenta relevante crescimento ao redor do mundo nos últimos anos, com destaque para a China, que aumentou drasticamente os investimentos no setor e tornou-se o maior produtor de módulos fotovoltaicos do mundo (Casarin, 2019). Além do alto potencial de geração eólica, o Brasil é destaque em seu potencial de geração solar como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Total diário da irradiação global horizontal



Fonte: Brasil, 2020, online.

A energia solar tem sido a fonte de maior crescimento anual em capacidade instalada global, impulsionada pela redução de custos, avanços tecnológicos e amplo potencial técnico. Sua flexibilidade e modularidade permitem projetos de diferentes escalas, tornando-a uma alternativa competitiva para uma matriz energética limpa e sustentável. No entanto, a rápida evolução tecnológica gera incertezas, já que novas

soluções podem tornar tecnologias rapidamente obsoletas. Por exemplo, entre 2014 e 2017, projetos de leilões de energia passaram de estruturas fixas para sistemas de rastreamento em um eixo (Brasil, 2020).

Os avanços nas células solares são significativos, destacando melhorias em células de silício e novos materiais, como perovskita e pontos quânticos. Tecnologias como módulos maiores e células bifaciais, que aumentam a geração em até 50%, também se sobressaem. Segundo o PNE 2050, espera-se que o custo da energia solar continue a cair, aumentando sua competitividade na matriz elétrica mundial, apesar das incertezas (Brasil, 2020).

Os desafios incluem a gestão de uma matriz energética com grande participação de geração variável, exigindo estratégias eficazes e planejamento detalhado. A competitividade da geração solar fotovoltaica tende a crescer, com previsão de expansão significativa da geração centralizada, estimando-se que a capacidade instalada alcance entre 27 a 90 GW e a geração média varie de 8 a 26 GW até 2050 (Brasil, 2020).

O plano de recomendações para enfrentar os desafios da expansão da energia solar destaca ações para três períodos. Entre 2020 e 2030, sugere-se o desenvolvimento de novas ferramentas, tecnologias e modelos de negócios para melhorar a previsão e gestão da geração solar, além de integrar estudos ambientais e expansão de transmissão. De 2030 a 2040, recomenda-se aprimorar os estudos socioambientais em projetos solares, considerando efeitos cumulativos, e alinhar a geração solar com o planejamento de transmissão. Para o período de 2040 a 2050, o foco é articular com atores governamentais e setoriais para abordar regulamentações relativas ao descarte e reciclagem de componentes dos sistemas fotovoltaicos (Brasil, 2020).

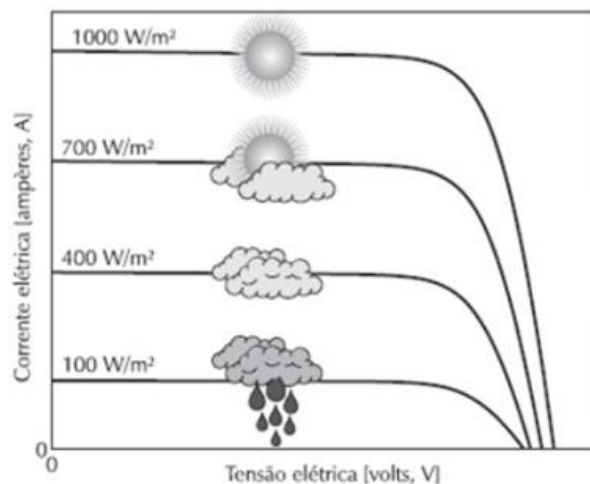
#### 3.1.1.5.1 Componentes de um sistema fotovoltaico

Serão apresentados toda composição de equipamentos e os conceitos fundamentais.

### 3.1.1.5.1.1 Células fotovoltaicas

A energia presente na radiação solar pode ser convertida em eletricidade mediante a utilização de células, módulos ou arranjos solares fotovoltaicos, geralmente feitos de silício (Si). O fenômeno físico que possibilita essa conversão é chamado de efeito fotovoltaico, que consiste na conversão direta da energia contida na radiação solar em energia elétrica, diferentemente de outros sistemas de aproveitamento da energia solar, que utilizam o aquecimento prévio de um fluido para, posteriormente, produzir energia elétrica a partir de energia térmica (Casarin, 2019).

Figura 16 - Influência da variação de irradiância solar na célula fotovoltaica.



Fonte: Casarin, 2019.

Os principais fatores que afetam a curva característica  $I \times V$  do gerador fotovoltaico e conseqüentemente suas propriedades é a quantidade de luz solar (irradiância) e a temperatura como visto na Figura 16. A irradiância ( $W/m^2$ ) influencia principalmente a corrente elétrica produzida pelo módulo, ao passo que a temperatura afeta principalmente a tensão e a potência fornecida (Casarin, 2019).

### 3.1.1.5.1.2 Módulos fotovoltaicos

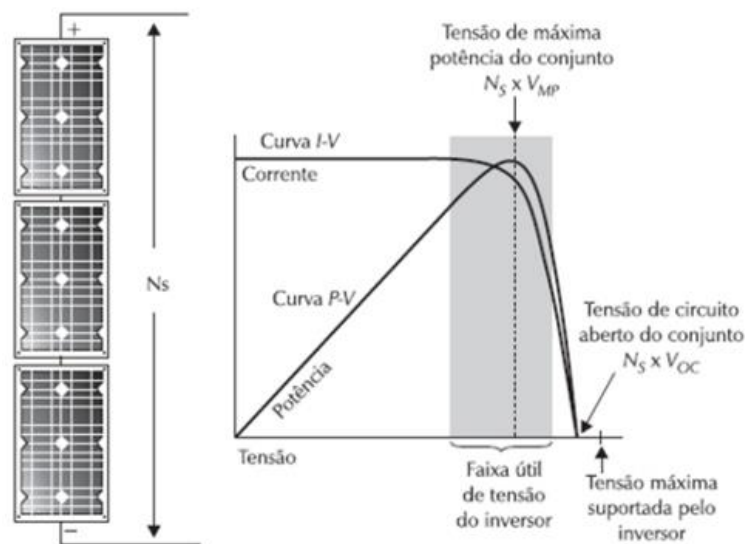
Os módulos fotovoltaicos são os equipamentos responsáveis por converterem a energia do Sol em eletricidade. Os arranjos de células dentro dos módulos são associados eletricamente em série, como é visto na Figura 17, de forma a fornecer

mais tensão de saída. Quando idênticas, submetidas à mesma irradiância solar ( $\text{W/m}^2$ ) e conectadas em série, ocorre a soma das tensões nos terminais de cada arranjo. A corrente elétrica, não é afetada (Casarin, 2019).

O que é diferente da curva de tensão e corrente (I-V) relacionada a corrente e tensão de um módulo para uma dada irradiância e temperatura da célula. Essa curva característica tem quatro pontos principais:

- Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) corrente que circula quando os condutores, positivo e negativo, estão conectados. Nessa condição, a tensão nos terminais do módulo torna-se nula;
- Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) tensão nos terminais do módulo quando a resistência entre os condutores, positivo e negativo, é infinita e, por consequência, a corrente é igual a zero;
- Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ) é a corrente que circula quando o módulo está produzindo a máxima potência;
- Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) é a tensão nos terminais do módulo quando ele está produzindo a máxima potência possível.

Figura 17 - Módulos fotovoltaicos conectados em série (esquerda) e curva I-V (direita).



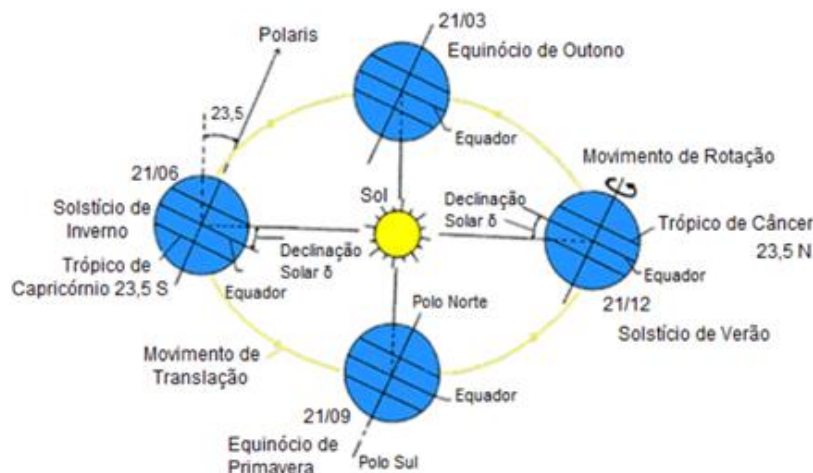
Fonte: Casarin, 2019.

A unidade comumente utilizada para expressar a potência do módulo é o Wp, que indica sua potência de pico, cujos parâmetros são obtidos considerando as

Condições Padrão de Testes (STC Standard Test Conditions), definida pela norma IEC 61215 (International Electrotechnical Commission). Essas condições visam informar o desempenho do módulo quando a temperatura da célula é de 25°C, uma irradiância solar de 1000 W/m<sup>2</sup> e massa de ar 1,5 (AM1,5). A NOCT considera um nível de irradiância de 800 W/m<sup>2</sup> e, tipicamente, a temperatura da célula estabelece-se em 45(+/-3)°C Já inclinação e a orientação corretas dos módulos fotovoltaicos são essenciais para maximizar a captação de radiação solar e, conseqüentemente, a eficiência na geração de energia elétrica (Campos et. al. 2022).

A Figura 18 representa o movimento anual de rotação em torno do sol, percorre em trajetória elíptica um plano inclinado em aproximadamente 23,5° com relação ao plano equatorial. Esta inclinação, juntamente com o movimento de translação, causa variação da elevação do sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, originando as estações do ano. A Declinação Solar ( $\delta$ ), representada na Figura 19, é definida como a posição angular do sol, ao meio-dia solar, em relação ao plano do Equador, e varia de acordo com o dia do ano, dentro do limite entre -23,45° e 23,45° (CEPEL, 2006).

Figura 18 - Declinação Solar.



Fonte: Besso, 2017.

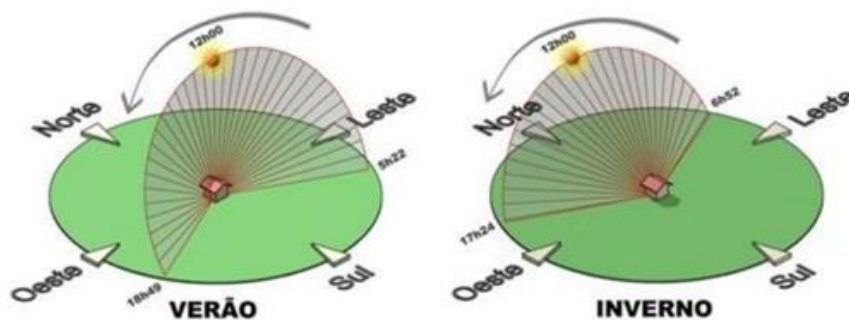
A duração do dia e a quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre apresenta variabilidade temporal característica de dois ciclos: o ciclo anual e o ciclo diário. O ciclo anual ocorre como consequência da



inclinação em 23,45 graus do eixo axial da Terra com relação ao plano orbital do planeta em torno do Sol (Besso, 2017).

Esta declinação reflete-se em duas trajetórias, como apresentado na Figura 19, predominantemente diferenciadas pelo verão e pelo inverno, conhecido, como solstício de inverno e solstícios de verão.

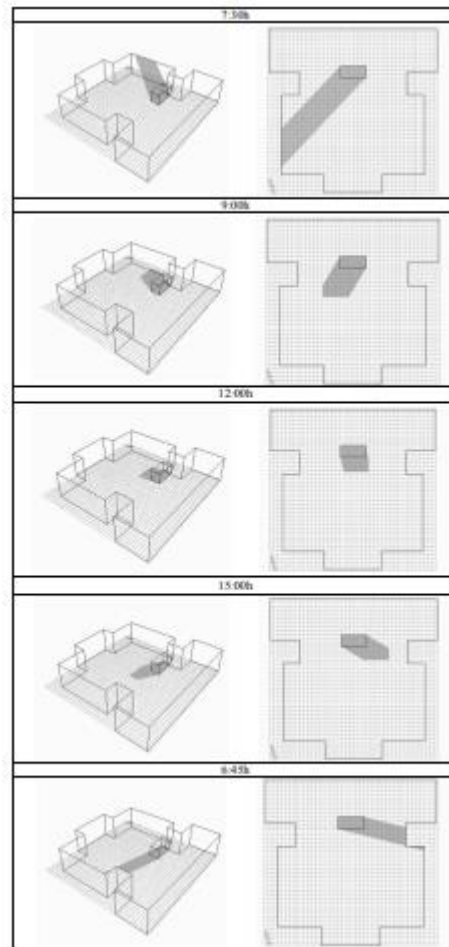
Figura 19 - Movimento Solar Diurno no Hemisfério Sul.



Fonte: Besso, 2017.

Marinoski, Salamoni e Rüter (2004) apresentam um estudo sobre a implantação de um sistema fotovoltaico no edifício do CREA-SC (Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Santa Catarina), em Florianópolis-SC, destacando o efeito prático da declinação solar no sombreamento. A Figura 20 apresenta o efeito do sombreamento no solstício de inverno, já a Figura 21 o solstício de verão.

Figura 20 - Sombreamento no telhado (solstício de inverno).



Fonte: Marinovski, Salamoni e Rütther, 2004, p. 5.



Figura 21 - Sombreamento no telhado (solstício de verão).

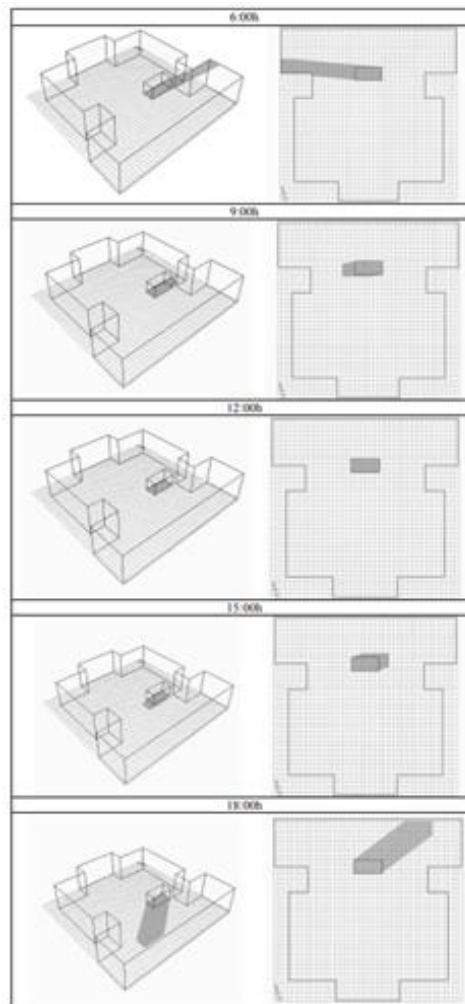


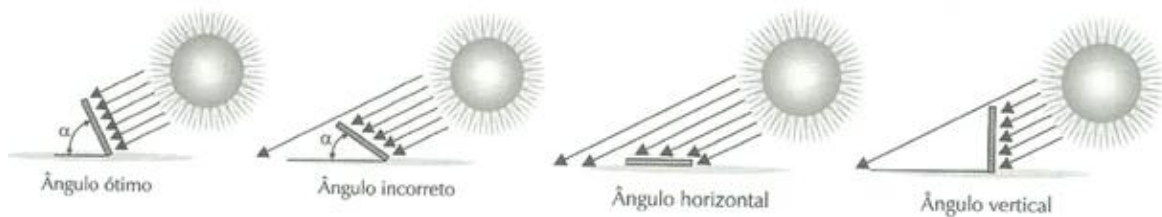
Figura 3. Sombreamento no telhado (solstício de verão)

Fonte: Marinovski, Salamoni e Rütther, 2004, p. 6.

Para compensar a incidência irregular dos raios solares na superfície terrestre, é necessário encontrar um ângulo de inclinação de forma que a captação dos raios solares seja otimizada. Segundo Casarin (2019) existem duas orientações básicas que devem ser seguidas para a correta instalação de um módulo solar fotovoltaico:

1. Quando no hemisfério sul, sempre que possível, orientar o módulo com sua face voltada para o norte geográfico, o que maximiza a produção média diária de energia;
2. Ajustar o ângulo de inclinação correto do módulo com relação ao solo para otimizar a produção de energia ao longo do ano. Para isso, deve-se levar em conta a latitude geográfica da localidade onde o sistema é instalado

Figura 22 - Demonstração do ângulo ótimo para inclinação de painéis solares.



Fonte: Energês, 2022, *online*

A Figura 23, mostra o ângulo de instalação recomendado para módulos fotovoltaicos de acordo com a latitude do local da instalação. Onde  $\alpha$ , é o ângulo de inclinação recomendado.

Figura 23 - Inclinação recomendada conforme a latitude geográfica.

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: Casarin, 2019.

### 3.1.1.5.1.3 Inversores Fotovoltaicos

Os inversores fotovoltaicos são equipamentos que convertem a energia elétrica originada em corrente contínua nos módulos fotovoltaicos, para corrente alternada, em tensão e frequência compatíveis com a rede da concessionária de distribuição de energia. Mas também, possui a função de maximizar a energia elétrica gerada, rastreando sempre o ponto de máxima potência (MPPT).

Uma das funções mais importantes dos inversores é o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Esse recurso otimiza a produção de energia ao rastrear constantemente o ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos, garantindo que o sistema opere na sua eficiência máxima. Além disso, os inversores monitoram dados operacionais, coletando e transmitindo informações sobre o desempenho do

sistema, o que permite o acompanhamento em tempo real e a identificação de possíveis problemas.

Os inversores também possuem mecanismos para desconectar o sistema da rede elétrica em caso de falhas ou manutenção, garantindo a segurança. Eles são equipados com diversos dispositivos de proteção, como proteção contra sobrecargas e sobretensões tanto na corrente alternada quanto na corrente contínua, proteção contra conexões incorretas, desligamento automático em caso de falha na rede elétrica (função anti-ilhamento) e monitoramento da temperatura do inversor, desligando o sistema se necessário para evitar superaquecimento.

É importante considerar que o sombreamento de um único módulo pode afetar a produção de energia de todo o arranjo, especialmente em sistemas conectados em série, o que pode limitar a eficiência do sistema e a utilização da área disponível. O MPPT precisa de uma tensão mínima para operar e possui um valor máximo de entrada. A tensão máxima suportada pelo inversor está relacionada à tensão de circuito aberto dos módulos fotovoltaicos, determinando o número máximo de módulos que podem ser conectados a um MPPT (Casarin, 2019).

Existem diferentes tipos de inversores, como os inversores ongrid ou grid-tie, que são conectados à rede elétrica e são os mais comuns em sistemas residenciais e comerciais; os inversores off-grid, utilizados em sistemas independentes da rede elétrica, geralmente em áreas remotas; e os microinversores, que são instalados diretamente nos módulos fotovoltaicos, permitindo maior flexibilidade e eficiência em sistemas com sombreamento parcial.

Em resumo, os inversores fotovoltaicos são vitais para a eficiência e segurança dos sistemas de energia solar. Eles não apenas convertem a energia, mas também otimizam a produção, monitoram o desempenho e protegem o sistema contra diversas falhas. Escolher o inversor adequado é crucial para maximizar o retorno do investimento em energia solar.

#### 3.1.1.5.1.4 String Box CC e Caixa De Proteção CA

Na caixa de proteção estão concentrados todos os elementos de segurança necessários para proteger tanto o sistema quanto os operadores, conforme exigências da concessionária de energia elétrica, abrangendo tanto a parte de CC quanto a de CA. Entre esses elementos, destacam-se os fusíveis, a chave seccionadora CC e os dispositivos de proteção contra surtos (DPS CC e CA). Os fusíveis, em conformidade com a norma IEC 60269-6, são projetados para extinguir arcos elétricos em circuitos CC (Casarin, 2019). Para garantir segurança e funcionalidade, os circuitos CC e CA são mantidos isolados nas instalações fotovoltaicas.

O DPS é essencial para proteger cabos e equipamentos contra sobretensões, geralmente causadas por descargas atmosféricas, sendo projetado especificamente para atuar tanto em circuitos CC quanto CA. A *String Box* e as caixas de proteção CA devem ser conectadas ao inversor de frequência e ao quadro de carga da rede elétrica no local da instalação. No lado de CC, a *String Box* protege a instalação e os módulos fotovoltaicos contra descargas elétricas. Já no lado de CA, ela protege a instalação contra surtos oriundos da rede elétrica (Carvalho, 2006).

Adicionalmente, a *String Box* CC incorpora uma chave de desconexão e um dispositivo de proteção contra surtos (DPS). A chave de desconexão CC é importante para a manutenção do sistema fotovoltaico, permitindo a desconexão segura dos módulos e garantindo a proteção dos operadores, uma vez que, sob a incidência de luz solar, os terminais dos arranjos fotovoltaicos permanecem energizados (Casarin, 2019).

#### 3.1.1.5.1.5 Aterramento CC e CA

Para garantir o bom funcionamento e a segurança dos equipamentos em uma instalação fotovoltaica, é essencial que o sistema possua um aterramento adequado. Conforme a norma ABNT NBR 5410, recomenda-se preferencialmente o uso das armaduras do concreto das fundações para o aterramento. Alternativamente, podem ser utilizadas fitas, barras ou cabos metálicos imersos no concreto das fundações, malhas metálicas enterradas no nível das fundações que cobrem a área da edificação e são complementadas, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos

radialmente (pés-de-galinha). No mínimo, deve-se utilizar um anel metálico enterrado que circunda o perímetro da edificação, complementado, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente.

Todo o aterramento do sistema fotovoltaico, que na verdade é uma equipotencialização, deve ser conectado à malha de aterramento existente por meio do BEP (barramento de equipotencialização principal). Isso garante que todas as partes metálicas do sistema estejam no mesmo potencial elétrico, evitando diferenças de potencial que poderiam causar choques elétricos ou danos aos equipamentos.

Além disso, a norma ABNT NBR 16690, que trata especificamente de sistemas fotovoltaicos, reforça a importância do aterramento adequado para a segurança e eficiência do sistema. Ela detalha os requisitos para a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, incluindo as especificações para o aterramento e a proteção contra surtos elétricos.

Em resumo, o aterramento adequado de um sistema fotovoltaico é fundamental para garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas, além de assegurar o bom desempenho do sistema. Seguir as normas ABNT NBR 5410 e ABNT NBR 16690 é crucial para uma instalação segura e eficiente.

Para garantir o bom funcionamento e a segurança dos equipamentos em uma instalação fotovoltaica, é essencial que o sistema possua um aterramento adequado. Conforme a norma ABNT NBR 5410, recomenda-se preferencialmente o uso das armaduras do concreto das fundações para o aterramento. Alternativamente, podem ser utilizadas fitas, barras ou cabos metálicos imersos no concreto das fundações, malhas metálicas enterradas no nível das fundações que cobrem a área da edificação e são complementadas, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente (pés-de-galinha). No mínimo, deve-se utilizar um anel metálico enterrado que circunda o perímetro da edificação, complementado, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente.

Em resumo, todo o aterramento do sistema fotovoltaico, que na verdade é uma equipotencialização, deve ser conectado à malha de aterramento existente por meio do BEP (barramento de equipotencialização principal). Isso garante que todas as partes metálicas do sistema estejam no mesmo potencial elétrico, evitando diferenças de potencial que poderiam causar choques elétricos ou danos aos equipamentos.

Além disso, a norma ABNT NBR 16690, que trata especificamente de sistemas fotovoltaicos, reforça a importância do aterramento adequado para a segurança e eficiência do sistema. Ela detalha os requisitos para a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, incluindo as especificações para o aterramento e a proteção contra surtos elétricos.

Em resumo, o aterramento adequado de um sistema fotovoltaico é fundamental para garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas, além de assegurar o bom desempenho do sistema. Seguir as normas ABNT NBR 5410 e ABNT NBR 16690 é importante para uma instalação segura e eficiente.

### *3.1.1.6 Fonte Eólica*

A energia eólica é a energia que provém do vento, ou seja, é a energia obtida a partir do movimento de uma massa de ar, que nada mais é do que a mistura de diversos gases, principalmente, nitrogênio e oxigênio, e diminutas partículas sólidas de origem vegetal e mineral, como pólen e fuligens. Quando úmido, o ar pode apresentar, ainda, uma quantidade significativa de vapor de água (Tibola, 2009).

O termo eólico tem origem no latim *aeolicus*, que está relacionado ao deus dos ventos na mitologia grega, chamado Éolo. Segundo Tibola (2009) barcos a vela sumeriano, datado de 4000 a.C. são os primeiros indícios do uso de energia eólico. Os primeiros registros históricos da utilização de moinhos de vento são da Pérsia, por volta de 200 A.C. Na Europa, o desenvolvimento de moinhos de vento começou após o retorno das Cruzadas, culminando em sua ampla utilização para bombeamento de água na Holanda entre os séculos XVII e XIX

No início do século XXI, o Brasil enfrentou uma severa seca que reduziu os níveis de água nas barragens hidrelétricas do país, resultando em uma grave crise energética. Essa situação destacou a urgência de diversificar as fontes de energia. Embora a energia hidrelétrica represente mais de 75% da produção total de energia no Brasil, o governo tem incentivado a adoção de energia eólica e biomassa como alternativas primárias.

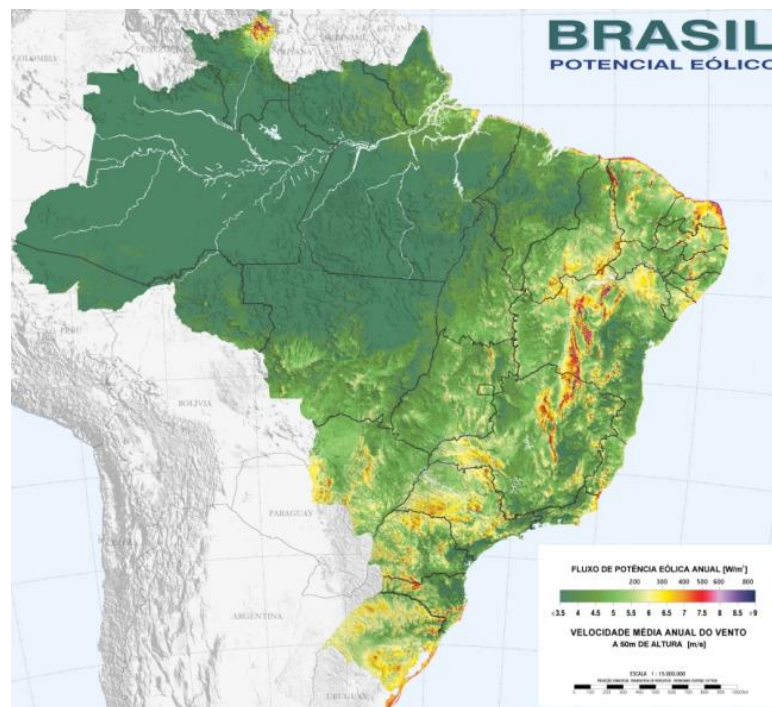
Em 1992, a primeira turbina eólica foi instalada em Fernando de Noronha. Dez anos depois, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), promovendo o uso de fontes renováveis, incluindo

biomassa, energia eólica e pequenas centrais hidrelétricas. Em 2009, o Brasil realizou seu primeiro leilão de energia eólica.

Apesar desses avanços, o Brasil ainda está longe de atingir seu potencial eólico, estimado em cerca de 140 GW, segundo estudo do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás. O período de junho a dezembro apresenta o maior potencial de energia eólica, coincidindo com a época de menor intensidade de chuvas. Assim, o vento se torna uma fonte complementar ideal à energia hídrica, a principal fonte energética do país, permitindo a preservação das bacias hidrográficas durante esses meses.

Tem-se as regiões nordeste e sul do Brasil como maiores concentradores de parques eólicos do país. Apesar disso, a maior parte do território nacional apresenta potencial para gerar energia eólica. A Figura 24 apresenta um mapa com o potencial eólico brasileiro por região.

Figura 24 - Mapa do potencial eólico brasileiro a 50 metros.



Fonte: Cebresp-Cepel, 2023.

Os desafios enfrentados na expansão da energia eólica no Brasil são diversos. Primeiramente, é necessário preparar-se para uma matriz energética com um grande percentual de geração variável e menor capacidade de controle. Além disso, a

logística de transporte dos equipamentos eólicos e a capacidade portuária para o desenvolvimento eólico offshore são questões críticas. A repotenciação e o descomissionamento dos parques eólicos também demandam atenção. Por fim, é fundamental promover um arcabouço legal e regulatório que remova barreiras e garanta a segurança jurídica para a expansão da energia eólica offshore.

Figura 25 - Desafios por período de tempo (PNE 2050)

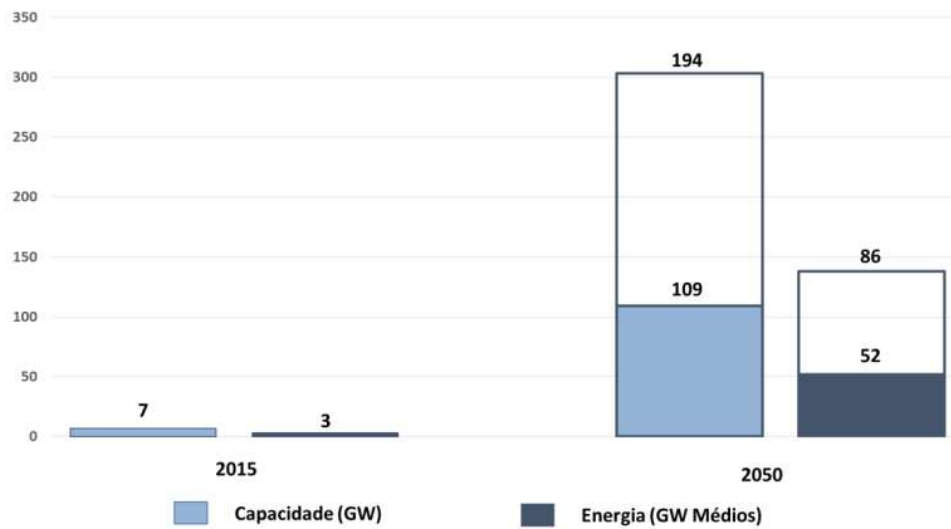
Desafios	2020 - 2030	2030 - 2040	2040 - 2050
Preparar-se para uma matriz com grande percentual de geração variável não controlável	Aprimorar a previsão de geração eólica para fins de operação do sistema elétrica pelo ONS		
	Incorporar melhorias aos estudos socioambientais desenvolvidos para projetos eólicos em uma perspectiva de questões ambientais decorrentes de efeitos cumulativos		
	Integrar as perspectivas de expansão da geração eólica e o planejamento da expansão da transmissão		
Logística de transporte dos equipamentos eólicos	Articular com diferentes atores governamentais e setoriais para destravar gargalos logísticos associados ao transporte de equipamentos eólicos.		
Avaliar a capacidade portuária com vistas ao desenvolvimento eólico offshore	Articular com diferentes atores governamentais e setoriais para destravar capacidade portuária suficiente para a expansão eólica offshore		
Repotenciação e Descomissionamento dos parques eólicos	Estabelecer regras de descomissionamento		
Necessidade de construção de um arcabouço legal e regulatório que remova barreiras para que a eólica offshore possa ser candidata para a expansão, com segurança jurídica	Aprimorar o marco regulatório existente visando possibilitar a exploração do recurso eólico offshore		

Fonte: Brasil, 2020.

Segundo o próprio PNE a capacidade instalada total esperada de eólica em 2050 pode ser ainda maior do que 200 GW se considerarmos alguns casos especiais, tais como na Expansão 100% Renovável e Frota 100% Elétrica. Em um cenário mais limitado, o PNE considera a capacidade instalada de 50GW o que ainda representa um cenário de amplo crescimento para o mercado.



Figura 26 - Evolução esperada da expansão da fonte eólica no Cenário Desafio da Expansão.



Fonte: Brasil, 2020.

Para enfrentar os desafios relacionados à expansão da energia eólica no Brasil, é crucial adotar uma abordagem estratégica. Primeiramente, aprimorar a previsão de geração eólica é essencial para otimizar a operação do sistema elétrico, considerando a variabilidade dessa fonte. Além disso, é fundamental incorporar melhorias nos estudos socioambientais, especialmente diante da complexidade decorrente de efeitos cumulativos. A integração entre as perspectivas de expansão da geração eólica e o planejamento da expansão da transmissão também deve ser priorizada. Por fim, a articulação com diferentes atores governamentais e setoriais é necessária para superar os gargalos logísticos associados ao transporte de equipamentos eólicos. Essas medidas contribuirão para o desenvolvimento sustentável dessa fonte energética no país.

Dado o grande potencial de exploração por sistemas eólicos a ainda a ser explorados no Brasil, inúmeras projetos surgem e novas tecnologias florescem. Exemplo dela são novos designers de pás Figura 27 e até mesmo, estudos com a exclusão delas existem. Um exemplo é a Vortex Bladeless que produz a partir da energia primária do vento a energia secundária elétrica a partir de vibração (Meoñez, 2020), como apresentado na Figura 28.

Figura 27 - Nova tecnologia de turbina eólica de eixo horizontal - The Archimedes LIAM F1.



Fonte: RESPECT, 2024.

A Vortex Bladeless é uma startup espanhola que desenvolveu uma nova forma de energia eólica, que utiliza um vórtice de ar para gerar energia elétrica sem pás ou rotação. A tecnologia é baseada em diferentes princípios físicos do que a energia eólica convencional, o que resulta em características distintas e novas possibilidades. A Vortex Bladeless está em uma longa jornada de desenvolvimento e produção dessa nova tecnologia (Meoñez, 2020).

Figura 28 - Princípio de funcionamento Vortex Bladeless.



Fonte: Vortex Bladeless, 2024.

Existem duas categorias de parques, os parques on-shore, que consistem dos parques em terra firme, como o da Figura 29. Para aproveitar o vento que sopra em terra, são construídos enormes complexos eólicos capazes de extrair o máximo potencial desse recurso limpo e renovável.

Figura 29 - Iberdrola e seu maior parque eólico onshore do mundo com 1.000MW na Austrália.



Fonte: Google

E também os parques *off shore*, localizados fora da costa, em geral, em alto mar como visto na Figura 30. A energia eólica offshore é aquela proveniente dos ventos que sopram em alto-mar. É neste local, sobre o leito marinho, que são instalados os parques que transformam vento em eletricidade. A energia eólica *off shore*, gerada em alto-mar, oferece maior capacidade produtiva devido aos ventos intensos (ENGIE, 2023).

Existe uma série de vantagens em recorrer a esse modelo. A principal delas é a ausência de barreiras em alto-mar, o que deixa os ventos mais intensos, aumentando a capacidade produtiva. Na prática, a energia gerada em uma usina eólica *off shore* flui através de um cabo, que segue até a subestação marítima, depois até a subestação terrestre e, então, é transferida para a rede de distribuição. Os cabos são feitos, na maioria dos casos, com cobre ou alumínio, e são revestidos com uma camada extra de proteção contra corrosão. Eles são conectados à turbina eólica por

meio de uma caixa de junção submarina, de onde a energia segue até a subestação terrestre (ENGIE, 2023).

Figura 30 - Grupo de energia dinamarquês Orsted: projeto Walney Extension. Na costa noroeste da Inglaterra.



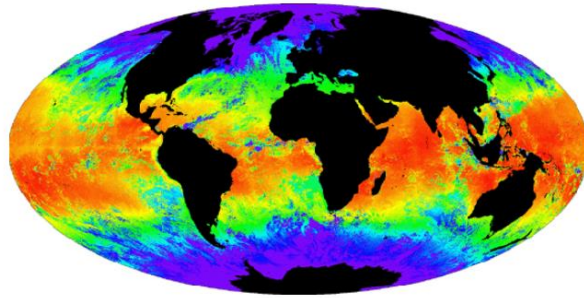
Fonte: Simões, 2018, *online*.

No caso do Brasil, o EPE através do PNE 2050 mapeou preliminarmente o potencial eólico offshore para as águas jurisdicionais brasileiras. Identificou áreas com ventos superiores a 7 m/s, abrindo novas perspectivas para a possível exploração desse recurso energético no País (Brasil, 2020).

#### 3.1.1.6.1 Vento

O movimento do ar deve-se, principalmente, à expansão e contração dos fluídos (gases) que à compõem, ocasionadas pelos aquecimentos desiguais oriundos da radiação solar que incide com diferentes ângulos de ataque do equador aos polos.

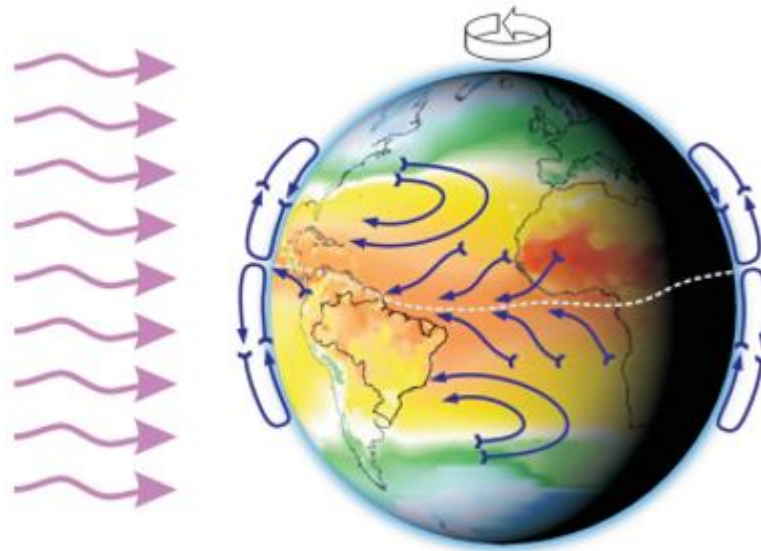
Figura 31 - Variações do aquecimento oceânico



Fonte: Tibola, 2009, p. 13.

Os gases quentes, com moléculas mais 'expandidas' e conseqüentemente com densidade relativa menor, gerados no equador, sobem e dirigem-se aos polos formando massas de ar quente, enquanto massas de ar frio sopram dos polos para o equador, mais baixas que o ar quente (Tibola, 2009). As variações de temperatura do equador aos polos podem ser observadas na Figura 32.

Figura 32 - Distribuição geral dos ventos



Fonte: Tibola, 2009, p. 13.

Os movimentos de rotação e translação da Terra também são importantes fatores para a 'geração' dos ventos de forma desigual nos diversos pontos do planeta, e variações desses durante as estações do ano. As brisas marinhas e os ventos de vales e montanha são causados armazenamento de energia solar durante o dia, pelas

massas de água e terra, e posterior devolução durante a noite. Como a terra se resfria mais rapidamente o ar que ela aquece sobe e vai em direção aos oceanos, enquanto o ar mais frio do mar direciona-se para a terra (Tibola, 2009).

Os ventos podem ser classificados de acordo com a escala de Beaufort, que varia desde brisas suaves até furacões, categorizando-os conforme sua velocidade. A classificação pela escala de Beaufort é amplamente utilizada para avaliar e descrever a intensidade do vento. No desenvolvimento de modelos computacionais para sistemas eólicos, especialmente ao utilizar geradores síncronos, essa classificação é fundamental para realizar estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica. A tabela 1 abaixo evidencia isso:

Tabela 1 - Classificação dos ventos em função de sua velocidade: escala Beaufort de ventos

Velocidade do vento à altura de 10 metros sobre a superfície do solo		Escala de Beaufort dos ventos	Classificação
[m/s]	[km/h]		
0,0 - 0,4	< 1	0	Calmo
0,4 - 1,8	1 a 5	1	Ar suave
1,8 - 3,6	6 a 11	2	Brisa suave
3,6 - 5,8	12 a 19	3	Brisa
5,8 - 8,5	20 a 28	4	Brisa Moderada
8,5 - 11	29 a 38	5	Brisa fresca
11 - 14	39 a 49	6	Brisa forte
14 - 17	50 a 61	7	Próximo de temporal
17 - 21	62 a 74	8	Temporal
21 - 25	75 a 88	9	Temporal forte
25 - 29	89 a 102	10	Tempestade
29 - 34	103 a 117	11	Tempestade violenta
>34	>117	12	Furacão

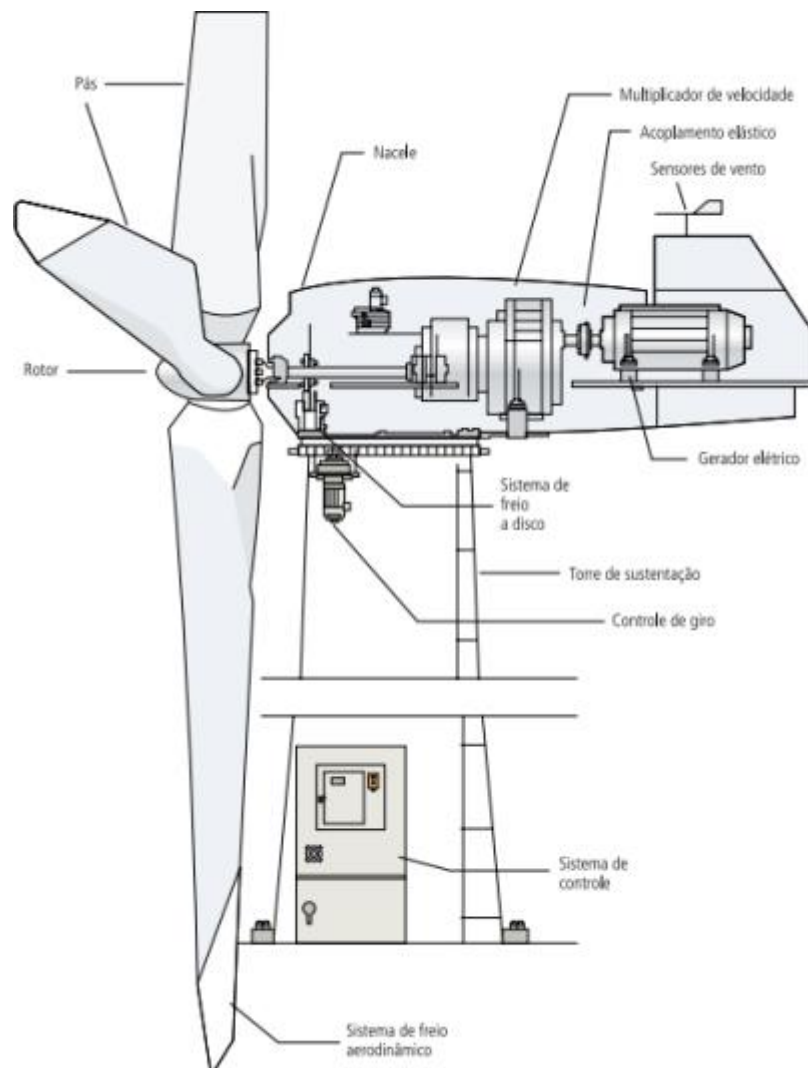
Fonte: Carvalho, 2006.

### 3.1.1.6.2 Componentes De Um Sistema Eólico Tradicional

Os sistemas eólicos são divididos em dois grandes grupos, sendo o primeiro o dos sistemas de grande potência e o segundo, os de baixa potência (Tibola, 2009). Também, podemos classificar em turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical. Por exemplo, um sistema de energia eólica horizontal é formado pelo rotor que possui a função de converter a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. O multiplicador, também chamado de caixa de engrenagens, transmite a energia

mecânica do eixo do rotor para o gerador. A nacelle é a estrutura que abriga todos os componentes mecânicos e elétricos da turbina eólica. O cubo, que é uma parte do rotor onde as pás são fixadas, é responsável por transmitir a força do vento para o eixo. Já, o gerador tem a tarefa de converter a energia mecânica em energia elétrica. Quanto aos seus aspectos construtivos, como apresentado na Figura 33, eles são análogos e serão apresentados a seguir.

Figura 33 - Componentes de um sistema eólico.



Fonte: Müller, 2015, p. 15.



### 3.1.1.6.2.1 Torre

Mostrado na Figura 34, a torre é elemento de sustentação do aerogerador e está sujeita a grandes esforços provenientes da força axial que as hélices sofrem. Em seu aspecto construtivo apresentam-se como torre tubular e torre treliçada.

Figura 34 - (a) Torre tubular e (b) torre treliçada.



(a) Torre tubular.



(b) Torre treliçada.

Fonte: Carvalho, 2006.

Para os sistemas eólicos existe a correlação entre a velocidade do vento com a altura da torre (Tibola, 2009).



Figura 35 - Aumento da velocidade do vento com a altura.

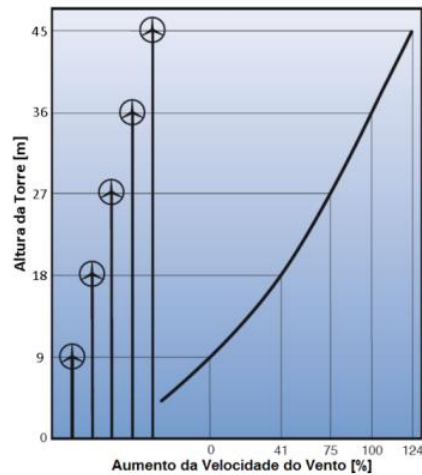


Figura 1.20 – Aumento da velocidade do vento com a altura. Fonte: *United States Department of Energy*.

Fonte: Tibola, 2009.

### 3.1.1.6.2.2 Rotor

São responsáveis por capturar a energia cinética dos ventos e entregá-las ao eixo do gerador elétrico. O rotor é conhecido como a parte giratória da turbina. Contém as três pás de uma turbina eólica e o cubo, que é a estrutura central que conecta cada uma das pás. Apresentam-se em duas formas construtivas: eixo horizontal e eixo vertical.

#### 3.1.1.6.2.2.1 Turbina de Eixo Vertical

A energia primária em turbinas de eixo vertical possui menor aproveitamento, assim, portanto são menos utilizadas em larga escala. Restringem-se a instalações em áreas urbanas. No entanto, são mais adequadas para contextos em que ventos turbulentos são predominantes. A turbina eólica de eixo vertical WS-4, apresentada na Figura 36, é uma solução inovadora para a geração de energia renovável. Com seu design helicoidal, ela é capaz de operar eficientemente independentemente da direção do vento, o que é ideal para locais com ventos variáveis.

Figura 36 - Turbina eólica de eixo vertical: WS-4.



Fonte: Pagina do fabricante, 2024.

As turbinas eólicas de eixo vertical apresentam uma série de vantagens e desvantagens que são apresentadas no quadro abaixo.

Quadro 1 - Vantagens vs desvantagens turbina de eixo vertical.

Vantagem	Desvantagem
Mais adequadas para ventos turbulentos	Menor aproveitamento da energia primária eólica
Mecanismos de transmissão de potência simplificadas	Ângulos de ataque e de deslocamento em relação à direção dos ventos
	Vibrações acentuadas

Fonte: Tibola, 2009.

### 3.1.1.6.2.2.2 Turbina de Eixo Horizontal

Possui um maior aproveitamento da energia primária, portanto, é utilizado em larga escala. Grandes usinas *off-shores* e *on-shores* predominantemente utilizam deste tipo de tecnologia. Diferentes tecnologias são empregadas e um exemplo é a flexibilidade e abrangência quanto ao número dos rotores. Há aspectos construtivos de uma, duas, três, quatro ou múltiplas pás.

A turbina eólica de eixo horizontal SG 5.0-145, fabricada pela Siemens, é um modelo *on shore*. Com três pás aerodinâmicas. Este modelo, apresentado na Figura 37, é uma escolha robusta para projetos de energia renovável que buscam maximizar a produção de energia elétrica.

Figura 37 - Turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: Gamesa, 2024, online.

As turbinas eólicas de eixo horizontal apresentam uma série de vantagens e desvantagens que são importantes considerar. Elas são apresentadas no quadro abaixo.

Quadro 2 - Vantagens vs desvantagens turbina de eixo horizontal.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Maior rendimento da energia primária.	Necessidade de mecanismos que permita posicionamento do eixo do motor.
Utilizado em larga escala.	
Boa relação entre torque de partida por área de varredura.	

Fonte: Tibola, 2009.

Como apresentado por Tibola (2009), a potência teórica máxima é dada pela expressão conhecida como Equação de Betz:

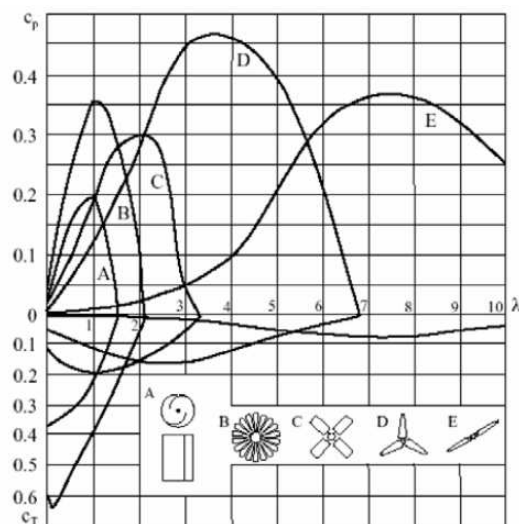
$$P_{\max} = P(C_{p\max}) = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{p\max}$$

Onde,

- $C_{p\max}$  é o coeficiente de potência máxima;
- $\rho$  é a densidade do ar em quilogramas por metro cúbico [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
- $A$  é a área de cobertura pelas pás da turbina eólica em metros quadrados [ $\text{m}^2$ ];
- $v$  é a velocidade da 'massa' de ar.

A Figura 38 apresenta alguns coeficientes de potência e torque em função de diversos tipos construtivos de hélice, onde se percebe que aquelas que possuem o maior coeficiente e conseqüentemente possibilidade de extrair maior potência.

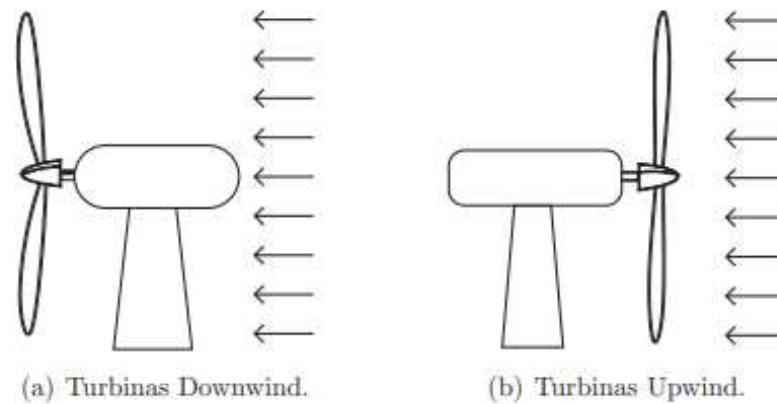
Figura 38 - Coeficientes de potência e torque para várias topologias de rotores eólicos.



Fonte: FAATEC, 1948.

Em turbinas de eixo horizontal as pás podem ser posicionadas a montante (*Upwind*) ou a jusante (*Downwind*) da torre conforme ilustra a Figura 39.

Figura 39 - Tipos de turbinas quanto à posição das pás em relação ao vento incidente.



Fonte: Carvalho, 2006.

Carvalho (2006) diz que a opção *upwind*, é a mais utilizada devido ao fato de o vento incidente não ser perturbado pela estrutura. A opção *downwind*, em que o vento ataca as pás após a passagem pela estrutura, tem sido progressivamente abandonada, devido ao escoamento ser perturbado pela própria torre antes de incidir as pás da turbina.

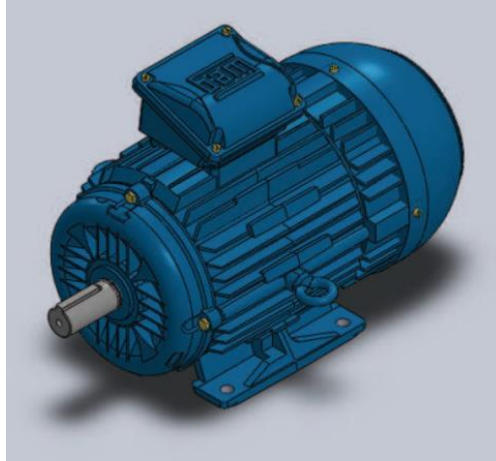
### 3.1.1.6.3 Gerador

Os geradores elétricos são os responsáveis por converter a energia mecânica de rotação entregue em seu eixo pelo rotor eólico em energia elétrica (Tibola, 2009).

Elas podem ser máquinas de corrente contínua que dispensa uso de retificadores CA-CC. Podem ser máquinas síncronas convencionais. Tecnologia mais consolidada e estabilizada. Máquina de indução é outra possibilidade. É uma máquina de baixo custo, necessita pouca manutenção e pode possuir alto desempenho, por essas razões, são usadas comumente em grandes e pequenos sítios eólicos e em plantas hidroelétricas de pequena potência. A necessidade de operação com velocidade variável fez com que as máquinas síncronas fossem muito solicitadas; porém, a escolha natural foi pelas máquinas síncronas a ímã permanente, mais conhecidas por PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine) (Tibola, 2009).

Neste trabalho, optou-se pelo gerador elétrico W22 Premium, Figura 40, acoplado ao motor controlado pelo inversor CFW11 emulando a turbina eólica, como visto na Figura 40.

Figura 40 - Gerador Elétrico WEG – W22 Premium.



Fonte: WEG, acesso 2024

#### 3.1.1.6.4 Nacelle ou Cabin

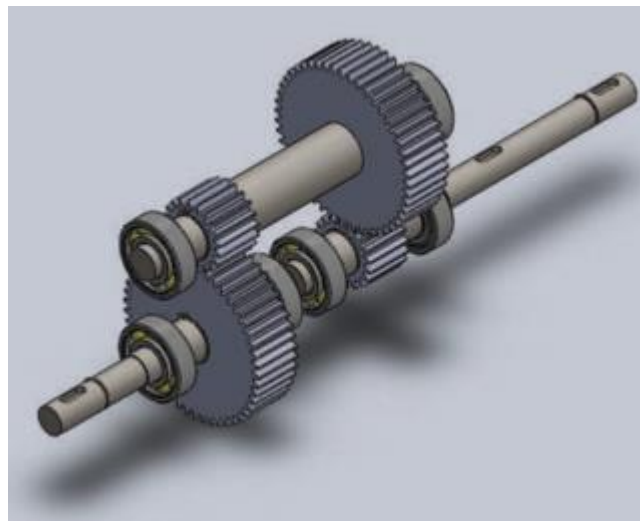
A cabine destina-se a alojar, dentre outros equipamentos, o eixo principal, o sistema de freio a disco, a caixa de velocidades ou de transmissão, o gerador elétrico e o mecanismo de orientação direcional (yaw control mechanism) (Carvalho, 2006).

Contém o eixo principal que transfere energia do rotor para a caixa de velocidade, que ajusta a frequência do rotor à do gerador. Possui controle hidráulico das travas aerodinâmicas e um mecanismo de orientação direcional, que alinha o rotor com o fluxo de ar usando um motor elétrico. Na parte superior da cabine, há um anemômetro e um sensor de direção.

### 3.1.1.6.5 Multiplicador

O multiplicador de uma turbina eólica é visto na Figura 41. Ele é um componente mecânico que é responsável por aumentar a velocidade do rotor para que o gerador possa produzir mais energia elétrica. O multiplicador é composto por um conjunto de engrenagens que elevam as rotações baixas e fornecem ao eixo um aumento significativo, permitindo o bom funcionamento do gerador.

Figura 41 - Multiplicador de velocidade.

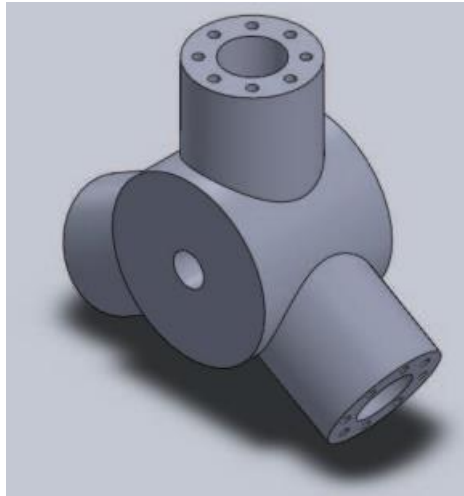


Fonte: Müller, 2015, p. 37.

### 3.1.1.6.6 Cubo

Conforme mostrado na Figura 42, o cubo é composto pelo hub, que é a peça responsável por conectar as pás do rotor ao eixo de rotação, desempenhando um papel essencial na transmissão de movimento (Müller, 2015).

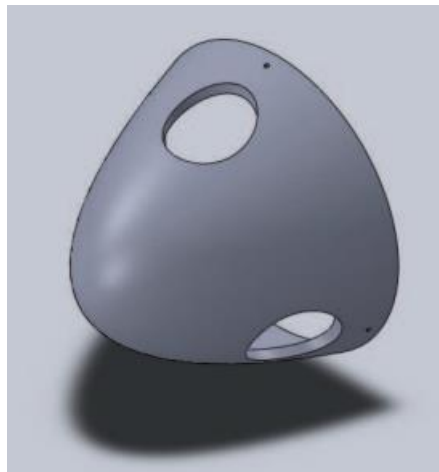
Figura 42 - Hub.



Fonte: Müller, 2015, p. 37.

Enquanto a Figura 43 apresenta a cúpula frontal, que tem como objetivo melhorar a performance aerodinâmica:

Figura 43 - Cúpula frontal



Fonte: Müller, 2015, p. 37.

### 3.2 CONVERSORES

Na gestão de uma uR CA, os inversores desempenham funções distintas. Segundo quanto a suas funcionalidades podem ser classificados em três grupos



principais: os que alimentam a rede, os que formam a rede e os que suportam a rede. Já quanto a sua natureza de conversão podem ser classificados em conversores CC-CC, inversores CC-CA, conversores CA-CA e retificador CA-CC (Bastidas Rodriguez; Ramos Paja, 2016). Ambas as classificações são discutidas abaixo.

Por mais que existem estas propostas de classificações, os conversores são RED que estão em um constante aprimoramento da sua tecnologia. Sua adequada seleção vai além dos níveis de tensão, frequência e sim com os requisitos de projeto da arquitetura. Logo, uma seleção da combinação dessas tecnologias ocorre ao construir a topologia de uma uR.

### **3.2.1 Quanto a Tecnologia Empregada**

Nesta seção serão apresentados os tipos de tecnologias para conversão da energia.

#### *3.2.1.1 Conversores CC-CC*

Os conversores CC-CC são usados para alterar o nível de tensão CC de uma fonte de energia para outra. A partir de uma entrada de CC e também fornecem uma saída em corrente contínua, mas com diferentes níveis de tensão (Biswal; Sabyasachi, 2012).

Atualmente, esses dispositivos são amplamente utilizados em várias aplicações, incluindo sistemas fotovoltaico, turbinas eólicas, veículos elétricos e híbridos, sistemas de energia CC de média e alta tensão, fontes de alimentação de telecomunicações, além de fontes de alimentação baseadas em células de combustível. Existem vários aspectos construtivos dos conversores CC-CC, incluindo: conversores Buck, conversores Boost, conversores Buck-Boost (Biswal; Sabyasachi, 2012).

Conversores CC-CC do tipo buck operando no modo de condução contínua e sendo controlados por um modulador de largura de pulso (PWM). Responsável por reduzir a tensão de entrada para uma tensão de saída menor (Fossas; Olivar, 1996).

Conversores do tipo Boost aumentam a tensão de entrada para uma tensão de saída maior. No contexto de energia solar, a queda de tensão pode ser causada pelo

sombreamento total ou parcial de um painel do sistema, o que resulta em menor produção energética. O conversor Boost controlado em modo de tensão altera a largura de pulso do PWM usado para o chaveamento, a fim de evitar quedas de tensão no barramento de saída (Vilela, 2011).

O conversor Buck-Boost é capaz de aumentar ou diminuir a tensão conforme necessário. Ele integra os princípios dos circuitos Buck e Boost, é crucial quando a voltagem ajustada precisa estar dentro da faixa da voltagem não ajustada. No entanto, os conversores Buck-Boost enfrentam desafios como alta voltagem de pico. Diversos tipos de Buck-Boost foram propostos para resolver esses problemas, como o Buck-Boost de ganho alto e estresse de voltagem baixo, o Buck-Boost intercalado e o Buck-Boost bidirecional. Cada um desses tipos apresenta vantagens e desvantagens específicas em termos de eficiência, complexidade de controle e custo do sistema.

### *3.2.1.2 Inversores CC-AC*

Os conversores CC-AC, ou inversores, convertem corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) e são essenciais para integrar sistemas de energia renovável com redes elétricas convencionais. Eles permitem o uso de energia renovável por dispositivos que operam em CA. Existem várias configurações de inversores, classificadas pela localização da rede ressonante, características das formas de onda de comutação e tipo de ressonância. Em sistemas fotovoltaicos, os inversores podem ser centrais ou micro inversores.

Na perspectiva da geração fotovoltaica os inversores centrais são usados em aplicações de maior escala para converter grandes quantidades de energia. Uma das vantagens é a manutenção facilitada por manter um menor número de dispositivos numa arquitetura centralizada. No entanto, eles também apresentam desvantagens significativas. As perdas de conversão são um risco maior, pois a sombra ou sujeira em qualquer um dos módulos pode afetar a performance de todo o sistema, dado que a produção é baseada no módulo de menor desempenho. Outro ponto negativo é que, em caso de falha do inversor central, toda a geração de energia do sistema é interrompida; os micros inversores instalados diretamente ao módulo fotovoltaico, o que permite uma gestão mais granular da energia.

Um adendo em sistemas fotovoltaicos são os micros inversores, cuja uma das principais funções realizar a conversão CC-CA, oferecem várias vantagens, começando pela eficiência de produção, pois cada módulo fotovoltaico opera de forma independente, garantindo que problemas em um painel não prejudiquem todo o sistema. A facilidade de expansão também se destaca, pois é possível adicionar mais painéis sem a necessidade de reconfigurar ou instalar mais inversores centrais. Além disso, permitem um monitoramento detalhado, possibilitando o gerenciamento individual da performance de cada módulo (Çelik; Teke; Tan, 2018).

### *3.2.1.3 Retificador CA-CC*

Os circuitos retificadores têm como principal objetivo a obtenção de corrente CC a partir de corrente CA. O processo de conversão envolve várias etapas: transformação, retificação, filtragem e estabilização. Podem ser classificados em diferentes tipos, incluindo retificadores de meia onda, onda completa, que pode ser com tap central - que é um ponto de conexão intermediário no enrolamento de um transformador - e ponte completa.

Retificador de meia onda retificam apenas um semi ciclo da onda de entrada AC. O retificador de meia onda possui um diodo em série com uma resistência de carga. São simples, mas resultam em uma saída CC de baixa qualidade com alto ripple, ou seja, pequenas oscilações de tensão.

Retificadores de onda completa essencialmente são dois retificadores de meia onda posicionados opostamente, com um controlando o primeiro semi ciclo e o outro gerenciando o semi ciclo subsequente melhorando a qualidade da tensão CC e reduzindo o ripple.

Os retificadores de onda completa com tap central contam com um transformador que possui um tap central no enrolamento secundário, funcionando como um ponto neutro e dividindo a tensão total em duas metades iguais de polaridades opostas. Este tipo de retificador utiliza dois diodos, cada um conduzindo em um semi ciclo diferente, o que permite a utilização eficiente de cada semi ciclo da corrente alternada. Contudo, a necessidade de um tap central pode aumentar o custo.

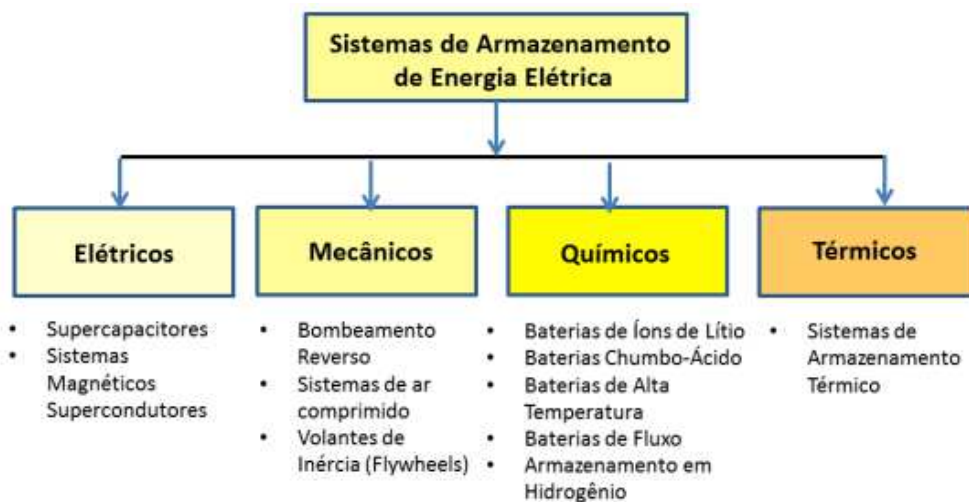
Compostos por quatro diodos, esta configuração elimina a necessidade de um tap. Eles tendem a ser menos eficientes do que os retificadores de ponte completa

com tap central, pois há queda de tensão através de um dos quatro diodos durante cada ciclo.

### 3.3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTOS

Armazenamento de energia significa um acúmulo de energia em diferentes naturezas, que pode ser armazenada e usada no futuro para realizar trabalho. A forma de energia convertida determina amplamente a classificação dos sistemas de armazenamento de energia. A energia pode ser armazenada por vários sistemas sejam eles químicos, elétricos, mecânicos e térmicos (Guney; Tepe, 2012). Destacando que há sistemas de armazenamento que combine estas tecnologias. De uma forma mais clara, o diagrama apresentado na Figura 44 explicita a hierarquia da classificação quanto a natureza com respectivos exemplos de tecnologias empregada.

Figura 44 - Tecnologias de Armazenamento de Energia.



Fonte: Bueno; Brandão, 2017.

O quadro 3 apresenta as características dos sistemas de armazenamento de, incluindo tipos, tecnologias, densidade de energia, custos de instalação e eficiência.

Quadro 3 - Características dos Sistemas de Armazenamento 2016-2030

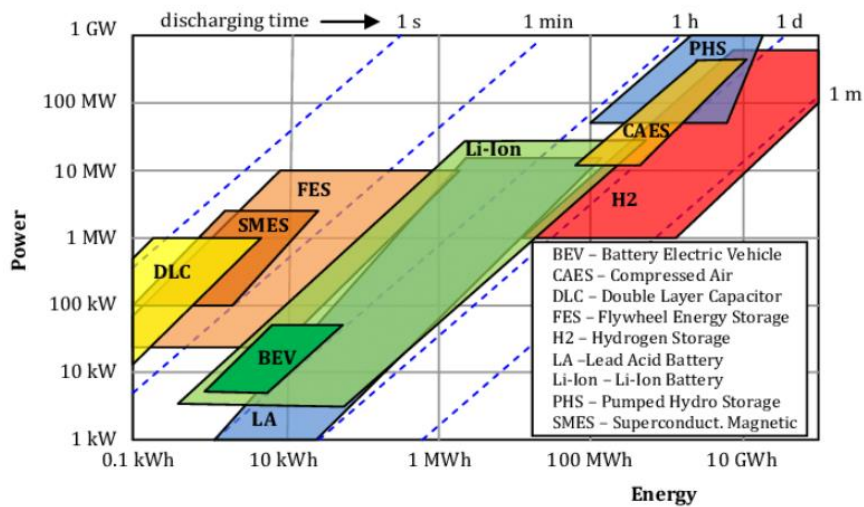
Tipo	Tecnologia	Densidade média de energia [kWh/m <sup>3</sup> ]	Custos de instalação [USD/kWh]	Eficiência [%]
Mecânicos	CAES	4	53	60
	FlyWheel	110	3000	84
	PHS	1	21	80
Térmicos	Sensível	15 - 200	25 - 30	50 - 98
	Latente	30 - 92	25 - 90	90 - 95
	Termoquímico	180 - 1200	80 - 160	45 - 63
Químicos	Li-Ion	410 - 470	352 - 1050	92 - 96
	Chumbo Ácida	75	147 - 263	80 - 82
	Fluxo	42-45	347-900	70

Fonte: Irena, 2017.

A adoção de tecnologias de armazenamento de energia é crucial para o futuro. O sucesso depende da adequação da aplicação à tecnologia. Classificar sistemas de armazenamento conforme sua aplicação é essencial. A reserva de energia garante operações críticas e a confiabilidade do sistema elétrico. O deslocamento de carga melhora a qualidade da energia e otimiza o consumo em horários de menor custo. A confiabilidade reduz interrupções no fornecimento. A gestão da demanda contratada permite economia ao descarregar baterias nos horários de pico (Masaud; Lee; Sen, 2010).

Elas têm diversos campos de aplicação e são definidas por sua potência, energia e tempo de descarga. Para correta seleção da tecnologia para sua respectiva aplicação, avaliar o tempo de descarga adequada, como a capacidade de potência e a energia empregada é fundamental. A Figura 45 apresenta gráfico detalhado que relaciona o tempo de descarga, a potência e a energia de diferentes tecnologias de armazenamento de energia (Andrzejewski et al. 2019).

Figura 45 - Posicionamento das tecnologias de armazenamento em função da sua capacidade de energia armazenada, potência e tempo de descarga.



Fonte: Andrzejewski et al. 2019.

Das tecnologias apresentadas destaca-se:

- NaS (Sódio-enxofre, *Sodium-Sulfur*): As baterias de sódio-enxofre operam em altas temperaturas e são adequadas para armazenamento de energia em grande escala. Elas têm um tempo de descarga que pode variar de algumas horas até um dia. A energia armazenada e a potência de capacidade são geralmente altas, tornando-as adequadas para uso em aplicações de rede elétrica e suporte de carga.
- NaNiCl (Cloro de Sódio-Níquel, *Sodium-Nickel Chloride*): Operam a altas temperaturas e são usadas em aplicações em veículos elétricos. O tempo de descarga pode ser semelhante ao das baterias NaS. 7
- H2 (Hidrogênio, *Hydrogen*): O armazenamento de energia em hidrogênio é altamente escalável, e a potência de capacidade pode ser ajustada para atender a demandas específicas de aplicações como transporte e geração de energia.
- PHS (Armazenamento hidráulico bombeado, *Pumped Hydro Storage*): É um sistema de armazenamento de energia por bombeamento hidráulico, que utiliza a diferença de altura entre reservatórios para armazenar e liberar energia. Tem um tempo de descarga variando de menos de uma hora até mais de um dia, com alta capacidade energética.

- CAES (Armazenamento de energia de ar comprimido, *Compressed Air Energy Storage*): É um sistema de armazenamento de energia por ar comprimido, que armazena energia sob a forma de ar comprimido em recipientes. Apresenta um tempo de descarga também variando entre menos de uma hora até mais de um dia.
- Li-Ion (Íon-Lítio, *Lithium-Ion*): São baterias de íon de lítio, amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos e veículos elétricos devido à sua alta densidade energética. As baterias Li-Ion têm tempos de descarga que vão desde segundos até algumas horas e estão na faixa média em termos de energia e potência comparadas às outras tecnologias.
- FES (Armazenamento de energia por volante de inércia, *Flywheel Energy Storage*): É um sistema de armazenamento de energia em volante, que armazena energia cinética em um rotor giratório. O armazenamento em volante mostra tempos curtos de descarga, na escala de minutos, com menor capacidade energética e potência em comparação com PHS e CAES.

Os sistemas de armazenamento locais reduzem o estresse nas linhas de transmissão longas, diminuindo custos de investimento e perdas de energia. O armazenamento de curto e longo prazo é uma solução proeminente para esses desafios (Guney; Tepe, 2017).

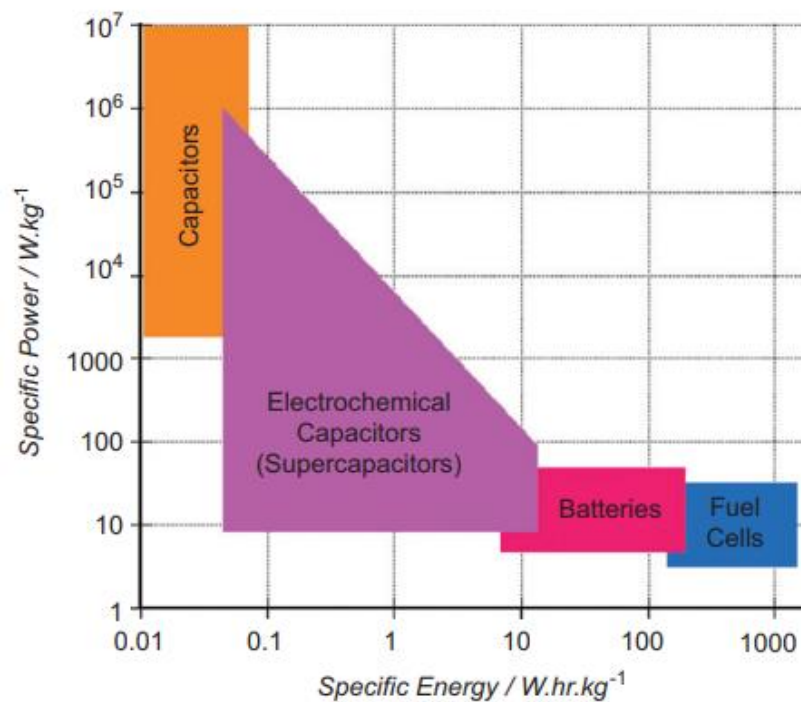
As aplicações de armazenamento de energia para fontes renováveis dividem-se em curta e longa duração. O armazenamento de curta duração estabiliza a produção de energia, reduzindo a volatilidade e melhorando a qualidade da energia, aumentando a confiabilidade da rede elétrica. O armazenamento de longa duração garante uma produção constante e previsível, alivia a congestão de transmissão e serve como backup em déficits inesperados não só na geração eólica, mas como toda cadeia de energia renovável (Masaud; Lee; Sen, 2010).

As tecnologias de armazenamento possuem características importantes como rendimento, tempo de vida, densidade de peso e volume, eficiência por ciclos de carga e descarga, densidade de energia e potência, além dos custos de investimento.

Na Figura 46 ilustra-se a relação entre energia específica (Wh/kg) e potência específica (W.hr/kg) em diferentes tecnologias de armazenamento de energia. A

Energia Específica é medida que indica a quantidade de energia por peso, afetando a autonomia da bateria. Quanto mais à direita, maior a energia por unidade de peso, destacando as baterias e células de combustíveis. A potência específica reflete a capacidade de fornecer energia. Quanto mais alto, maior a potência. Baterias estão na faixa moderada de ambas as medidas, enquanto capacitores têm alta potência, mas baixa energia específica, e células de combustível têm alta energia específica, mas potência moderada. Essa visualização ajuda a comparar as tecnologias quanto à capacidade de armazenamento e entrega de energia.

Figura 46 - Potência específica por Energia específica

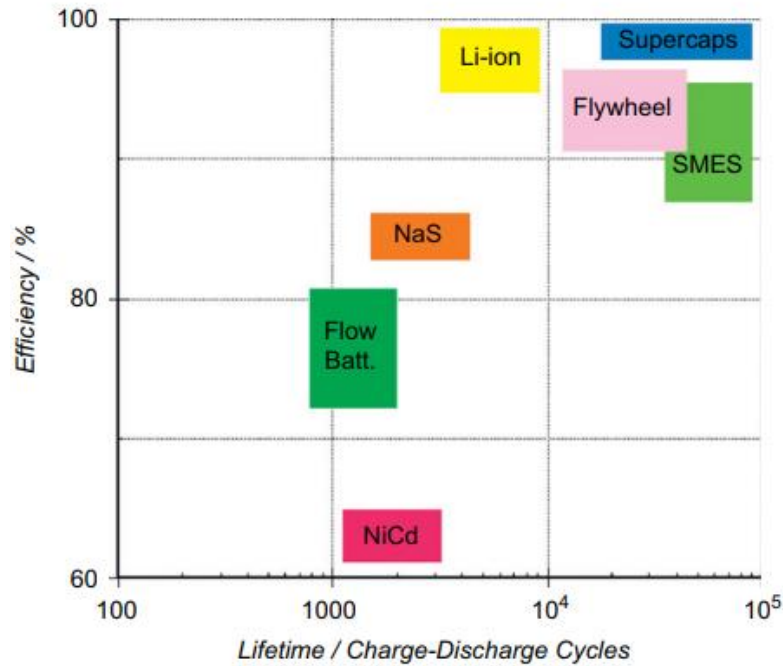


Fonte: Hall; Bain, 2008.

A Figura 47 mostra a eficiência em porcentagem de diferentes tipos de baterias e sistemas de armazenamento de energia em relação à sua vida útil, medida pelo número de ciclos de carga e descarga. As tecnologias representadas incluem íon-lítio (Li-ion), supercapacitores (Supercaps), volante de inércia (Flywheel), SMES, bateria sódio-enxofre (NaS), bateria de fluxo (Flow Batt.) e níquel-cádmio (NiCd). Pela imagem, nota-se que as tecnologias Li-ion e supercapacitores oferecem alta eficiência com uma vida útil mais longa em comparação com as outras tecnologias listadas.



Figura 47 - Eficiência por Ciclo de Vida



Fonte: Hall; Bain, 2008.

A Figura 48 apresenta uma comparação do Custo Nivelado de Armazenamento (LCOS), pela capacidade no tempo de armazenamento (Eixo inferior) e sua capacidade de energia (Eixo superior). O LCOS é uma métrica que avalia a viabilidade econômica, considerando tanto o custo inicial de implantação do sistema quanto os custos operacionais e de manutenção ao longo de sua vida útil. Esta métrica permite uma comparação mais precisa dos custos de diferentes sistemas de armazenamento. Algumas das tecnologias apresentadas incluem Lithium-ion, LFP (Lithium Ferro Fosfato), Zinc Air, Vanadium Redox Flow, entre outras. Esses pontos destacam a complexidade e os fatores variados que influenciam o custo e a eficácia das tecnologias de armazenamento de energia.

Figura 48 - Comparação do custo por armazenamento



Fonte: Cedengineering, 2024.

Algumas tecnologias de armazenamento serão apresentadas a seguir.

### 3.3.1 Armazenamento de Energia por Volante de Inércia

As rodas de inércia representam uma tecnologia promissora para o armazenamento de energia, aproveitando o princípio da energia cinética. A energia é armazenada na massa rotativa da roda, que gira a uma velocidade angular e o momento de inércia,  $J$ , da roda determina a quantidade de energia que pode ser armazenada.

$$J = \omega^2$$

São capazes de liberar ou absorver energia rapidamente, o que as torna dispositivos eficientes para manter a qualidade e a confiabilidade da energia fornecida.

### 3.3.2 Supercapacitor

Os supercapacitores são dispositivos eletroquímicos que armazenam energia no campo elétrico, semelhante a um capacitor de placas paralelas (Masaud; Lee, 2010). A energia armazenada é relacionada por:

$$\text{Energia Armazenada} = Cv^2,$$

onde  $C$  é a capacitância e  $v$  é a tensão entre as placas. Eles são classificados como dispositivos de resposta rápida e adequados para aplicações de curta duração e resposta rápida. Em comparação com baterias os supercapacitores permitem uma densidade de potência e energia muito maior (Masaud; Lee, 2010).

### 3.3.3 Baterias

As baterias, dispositivos que armazenam energia através de processos químicos, são versáteis e adequadas para diversas aplicações, desde pequenos dispositivos portáteis até sistemas de grande escala. As baterias oferecem independência dos sistemas elétricos e podem ser utilizadas em locais remotos sem acesso à eletricidade.

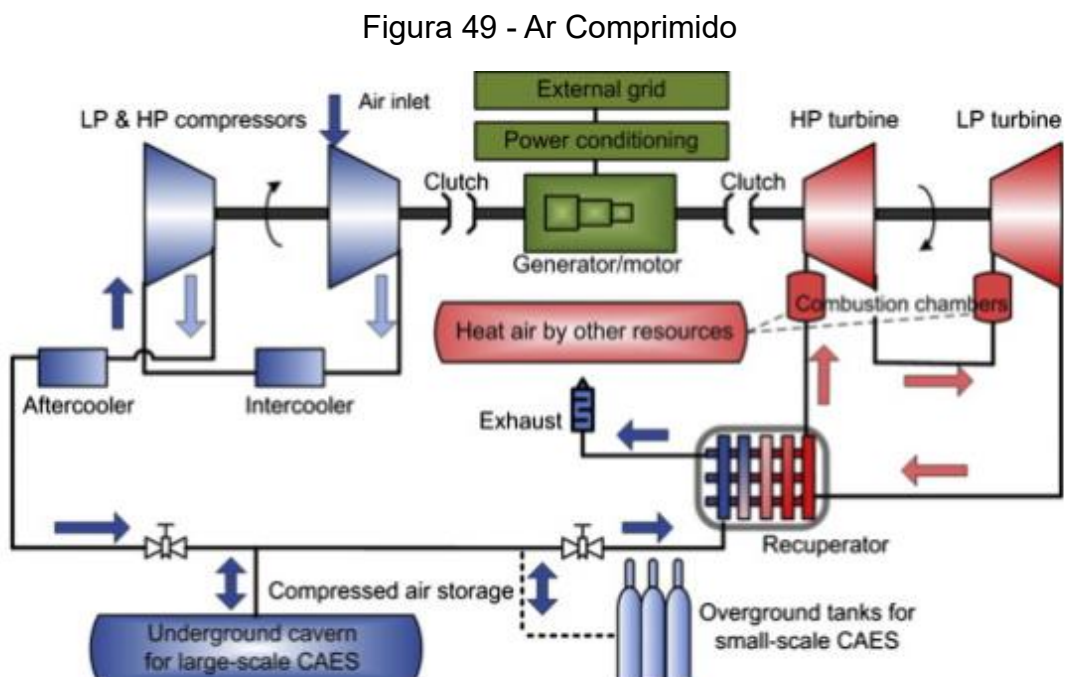
Com a crescente utilização das fontes renováveis para geração de energia elétrica e a necessidade de diversidade de aplicação, as baterias têm se destacado como dispositivos para armazenamento de energia. Nesse sentido, as baterias acumulam energia em forma química e a convertem em energia elétrica a partir de reações químicas. Existem diferentes tipos de baterias que são classificadas com base em sua composição. As baterias convencionais, incluindo ácido-chumbo, hidretos metálicos de níquel, íons de lítio, níquel cádmio e metal-ar. Elas funcionam através de reações eletroquímicas que geram fluxos de elétrons entre dois eletrodos. Por outro lado, as células de fluxo, como brometo de zinco, polissulfeto de brometo, brometo de vanádio e redox de vanádio, convertem energia elétrica em energia química por meio de uma reação química reversível entre duas soluções eletrolíticas líquidas (Campos *et al.* 2022).

### 3.3.4 Célula de Combustível de Hidrogênio

Uma célula de combustível é uma célula eletroquímica que transforma um combustível fonte em energia elétrica. As células de combustível podem funcionar de forma contínua. Classificada como um dispositivo de armazenamento de energia de resposta a longo prazo, a Célula de Combustível de Hidrogênio possui uma capacidade de potência típica inferior a 20MW. Suas vantagens incluem menor manutenção, emissões baixas e pouco ruído. Contudo, seu custo é bastante elevado (Masaud; Lee, 2010).

### 3.3.5 Armazenamento de Energia de Ar Comprimido

Sistemas de Armazenamento de Energia por Ar Comprimido (CAES) utilizam eletricidade para operar compressores que injetam ar em reservatórios, sob alta pressão, e depois empregam esse ar pressurizado em uma turbina para gerar energia (Masaud; Lee, 2010).



Fonte: Uddin, 2019, p. 21.

### **3.3.6 Armazenamento Hidráulico Bombeado**

O armazenamento por bombeamento é uma técnica que acumula energia potencial na forma de água, bombeada de um reservatório em altitude inferior para outro mais elevado. Em períodos de alta demanda por eletricidade, a água armazenada é liberada através de turbinas. O armazenamento hidroelétrico por bombeamento geralmente possui capacidade de potência inferior a 2000MW. Classificado como uma resposta de armazenamento de energia de longo prazo real, é tipicamente utilizado em aplicações que exigem fornecimento de energia por períodos que variam entre horas e dias (Masaud; Lee, 2010).

### **3.3.7 Energia Solar Concentrada (CSP)**

No sistema de energia solar concentrada (CSP), a luz solar é transformada em calor, que é armazenado e depois utilizado para gerar eletricidade em usinas convencionais. Diferente das tecnologias fotovoltaicas solares, o CSP pode armazenar energia térmica podendo realizar a conversão posterior em eletricidade. Nos casos de conversão para eletricidade, as usinas são compostas por duas partes: uma que coleta e converte a energia solar em calor e outra que transforma a energia térmica em eletricidade (Masaud; Lee, 2010).

## 4 CENÁRIOS

Faz-se necessário o completo entendimento dos requisitos e objetivos de projeto.

- Compatibilidade com o emulador eólico;
- Inserção de bateria LiFePo4 com Battery Management System (BMS);
- Potência fotovoltaica de 5 kWp com instalação em telhado;
- Potência eólico 11 Kw;
- Inversores que se comunicam entre si e com os outros equipamentos;
- Conexão de cargas inteligentes;
- Apenas com equipamentos de prateleira. O escopo do projeto não abrange o desenvolvimento de equipamentos em eletrônica de potência;
- Conexão com CLP;

Com estes dados podemos afirmar que no local da instalação, apresentada pela coordenada -27.60136, -48.51827, a média da irradiação solar diária média mensal é de 4,25 [kWh/m<sup>2</sup>.dia].

A proposta é a instalação do sistema fotovoltaico de 5,50 kWp integrado a bancada que emula o sistema eólico com capacidade de armazenamento. Logo, faz-se necessário a ligação do motor-gerador W22 na entrada de geração auxiliar do inversor DEYE que é preparado para geradores a diesel. Como sistema de armazenamento a bateria de Lítio fosfato LiFePo4 foi selecionada.

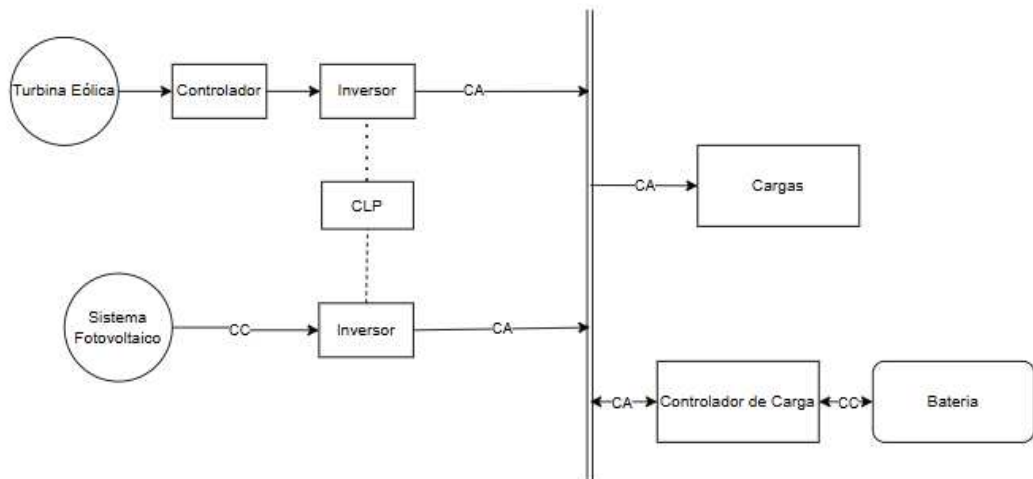
Assim, foram estabelecidas três distintas possibilidades de arquitetura, cada uma elaborada para maximizar a eficiência, promover a inovação e garantir a sustentabilidade.

### 4.1 INVERSORES INDEPENDENTES

Um sistema híbrido de geração de energia pode ser composto por uma turbina eólica e um sistema fotovoltaico completamente independentes. A turbina eólica é conectada a um controlador, que por sua vez está ligado a um inversor. Este inversor se conecta à rede elétrica CA. O sistema fotovoltaico é conectado diretamente a um inversor, que também se liga à rede elétrica CA. A rede elétrica distribui a energia para

as cargas (consumidores) e para um controlador de cargas, que gerencia a energia eólica e solar armazenada nas baterias.

Figura 50 - Inversores Independentes



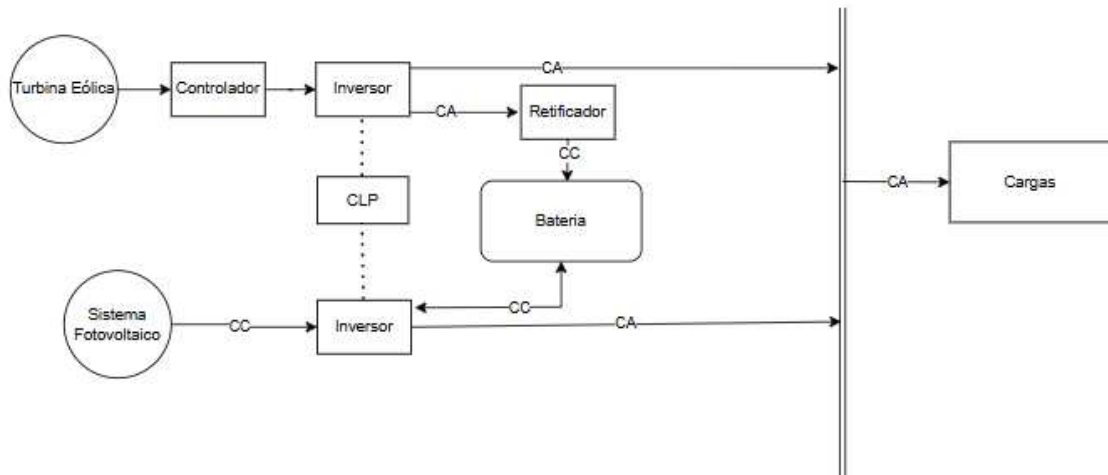
Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Neste cenário obrigatoriamente faz-se a necessidade de obter um controlador de carga. A comunicação entre os inversores e as variáveis manipuladas trazem uma complexidade maior, pois muito provavelmente que serão de fabricantes diferentes que possam a vir ter protocolos, arquitetura e limitações técnicas diferentes. Isto não impossibilita o trabalho, entretanto adiciona complexidade ao sistema.

#### 4.2 ACOPLAMENTO DA BATERIA AO RETIFICADOR EÓLICO

Um sistema híbrido de energia renovável que integra uma turbina eólica e um sistema fotovoltaico. A turbina eólica é conectada a um controlador que regula a energia gerada antes de enviá-la a um inversor, que converte a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). O sistema fotovoltaico também possui um controlador que gerencia a energia solar captada. Ambos os sistemas convergem em um Controlador Lógico Programável (CLP), seguido por uma bateria que armazena a energia em CC, com um retificador conectado ao CLP antes da bateria. Após a bateria, outro inversor converte a energia de volta para CA, que é então transmitida para as cargas.

Figura 51 - Acoplamento da Bateria ao Retificador Eólico



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

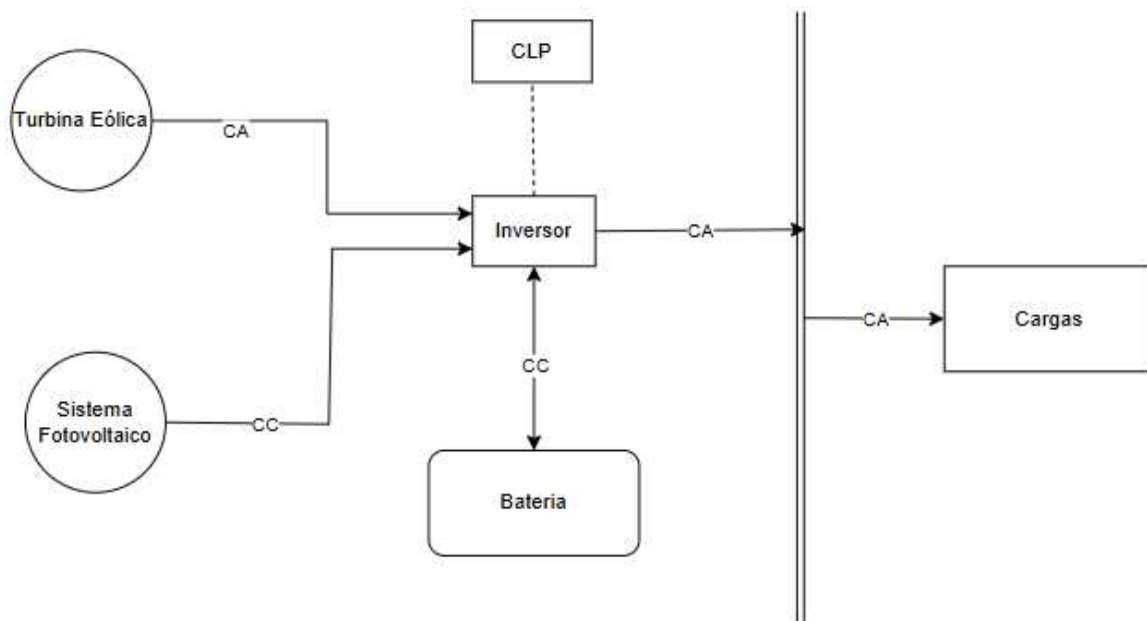
Primeiro, essa configuração evita a utilização do controlador de carga. Entretanto, exige um retificador da saída CA da turbina eólica para a devida conexão com a bateria. Segundo, caso seja excluído a conexão com a bateria pela turbina eólica, necessita-se utilizar do mecanismo de compensação da distribuidora. É uma arquitetura plausível.

#### 4.3 INVERSOR HÍBRIDO

Em uma extensa procura de equipamentos *on-shore* (Disponíveis comercialmente), viu-se uma grande carência no aspecto de compatibilidade de fontes renováveis. Na Intersolar, maior feira fotovoltaica da América Latina, a fabricante Deye apresentou seu sistema híbrido (O inversor híbrido trifásico SUN-12K-SG04LP3-EU) onde possibilitará a conexão com o gerador a diesel. Abrindo, assim, a possibilidade de adaptá-lo ao nosso emulador e, assim, diminuirmos os custos com equipamentos como um controlador de carga ou desenvolvimento de um retificador específico da energia oriunda do sistema eólico.



Figura 52 - Inversor Híbrido



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Portanto, encontramos uma arquitetura minimalista mais barata, mais fácil e mais eficiente. Esta última arquitetura apresentada foi selecionada como a arquitetura a ser implementada. Ela será apresentada a seguir.

## 5 PROJETO DA uR HÍBRIDA

Definido que a o sistema fotovoltaico será utilizado com o inversor híbrido inversor da marca DEYE, modelo SUN-12K-SG04LP3-EU, 10 módulos de 550W do modelo HY-M10/144H-550W, 1 bateria, já contida em laboratório, de lítio ferro-fosfato LiFePO4 Família UPLFP 48 e tomadas inteligentes para carga CA. Equipamentos apresentados nas próximas seções. O Sistema fotovoltaico instalado na seguinte Unidade Consumidora (UC)

- Responsável pela UC: Laboratório Multiusuário do Insituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Controle e Automação de Processos de Energia
- Endereço Completo: Campus Universitário Reitor João David, Laboratório de Inovação, R. Delfino Conti, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900
- Coordenadas georrefenciadas:
  - X: 744949.555610586, Y: 6944484.3007472, Fuso UTM: 22

Figura 53 – Planta de situação e localização



Fonte: Imagem tirada pelo autor desse trabalho, 2024.

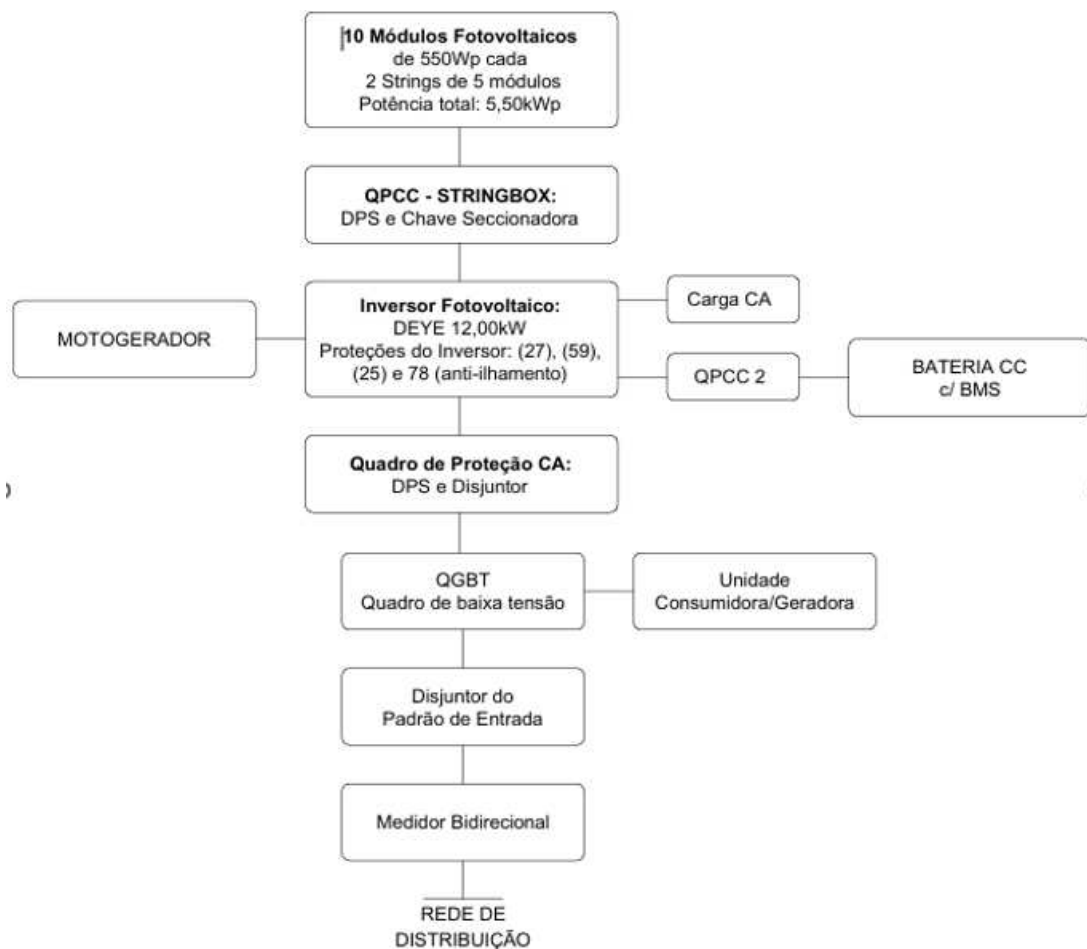
O diagrama de blocos apresentado na Figura 54 do cujo projeto de sistema renovável é visto na Figura 53. Cada componente e equipamento será explicado nas próximas sessões. Por ora, em uma perspectiva global, mais notável é capacidade do inversor conectar-se com a bateria, com módulos fotovoltaicos, com carga CA, e um gerador extra, que em nosso caso é o moto-gerador. Junto há os quadros de proteção de corrente alternada (QPCA) e os quadros de proteção de corrente contínua (QPCC)

No uR renovável, no sistema fotovoltaico dividiu-se em 2 arranjos fotovoltaicos, para aumentar a robustez caso venha ter algum sombreamento de alguma futura instalação nas redondezas. Os arranjos são compostos por 10 módulos da Honor Solar de modelo HY-M10/144H-550W DE 550 Wp, totalizando uma potência de 2750 Wp de potência por MPPT e 5,5 kWp na totalidade. Ou seja, isso impõe uma restrição

da fonte geradora extra, o motogerador, de 6,5 kW, quando o sistema fotovoltaico operar em sua potência máxima. Por exemplo, o sistema fotovoltaico está gerando 2 kw, a potência ao sistema eólico fica restrito a 10 kW. Dito isso, é importante salientar que uma prática de mercado é operar, aproximadamente, até 30% acima da potência nominal. Sendo assim, se o inversor possui 12kW de potência nominal, ele poderia operar até 15kW, como destacado no diagrama de blocos na Figura 53.

Destaca-se o motogerador que trabalha com corrente nominal de até 19,2 A e 380 V com disjuntor de 32 A. E também, são 6 tomadas as cargas CA em 220V e 20 A de capacidade. E, por fim, a bateria a qual foi protegida por um QPCC, a qual possibilita a conexão de mais outras. O Diagrama Multifilar é apresentado na Figura 55 evidenciam suas características

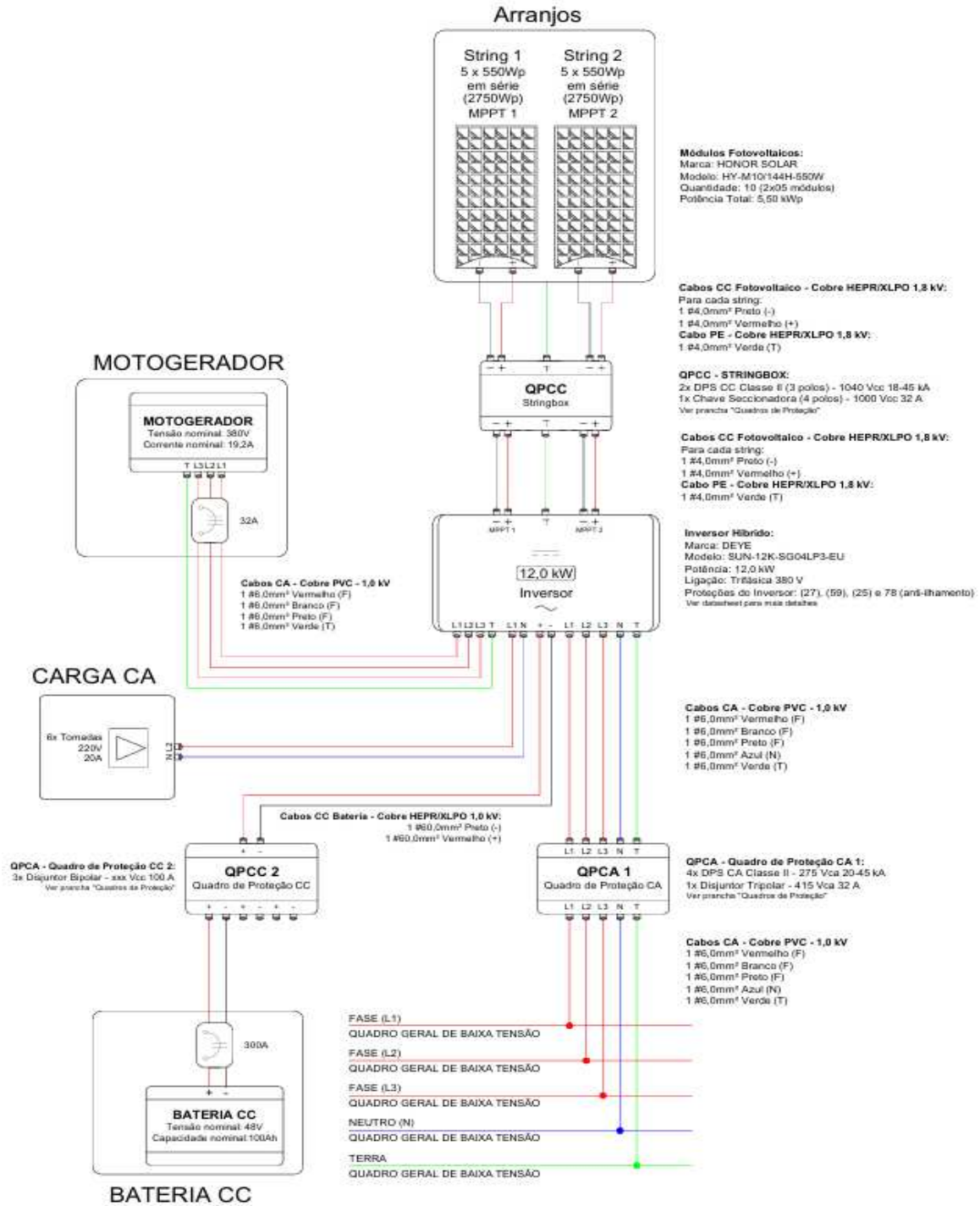
Figura 54 – Diagrama de blocos da uR



Fonte: Elaborado pelo autor desse trabalho, 2024.

Por fim, os dimensionamentos e características dos equipamentos selecionados serão descritos a seguir.

Figura 55 – Diagrama Multifilar da uR



Fonte: Diagrama elaborado pelo autor em parceria com a Colméia Solar, 2024.

Esta prancha e os demais documentos pertinentes ao projeto poder ser consultados na referência diagrams e pranchas referentes ao projeto da microrede.

## 5.1 MÓDULOS

O módulo selecionado foi da fabricante Honor Solar de 550W modelo HY-M10/144H-550W. Um módulo de fabricação monocristalina. A tecnologia com monocristais de silícios possui uma maior eficiência devido estrutura ordenada de um único cristal. Esta estrutura uniforme habilita uma maior vida útil. Sua eficiência é de 21,3%. Contém diodo by-pass e diodo de proteção contracorrente reversa. É certificado pelo Inmetro e é atestado para padrões como ISO9001:2015, ISO14001:2015 e OHSAS:180001 2007.

O módulo fotovoltaico Honor Solar de 550W é uma excelente escolha para quem busca eficiência e durabilidade em sistemas de energia solar. Com uma potência nominal de 550W, ele opera com uma tensão de 41,90V e uma corrente de 13,25A. Em condições de circuito aberto, a tensão é de 49,80V e a corrente de curto-circuito é de 14,05A. A eficiência do módulo é de 21,5%, o que o torna altamente eficiente na conversão de energia solar em eletricidade.

O módulo pode operar em temperaturas que variam de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ , o que o torna adequado para diversas condições climáticas. Especificação elétrica e, Condições de Teste Padrão (STC) \*Irradiância  $1000\text{ W/m}^2$ , Temperatura  $25^{\circ}\text{C}$ , Massa de Ar 1.5

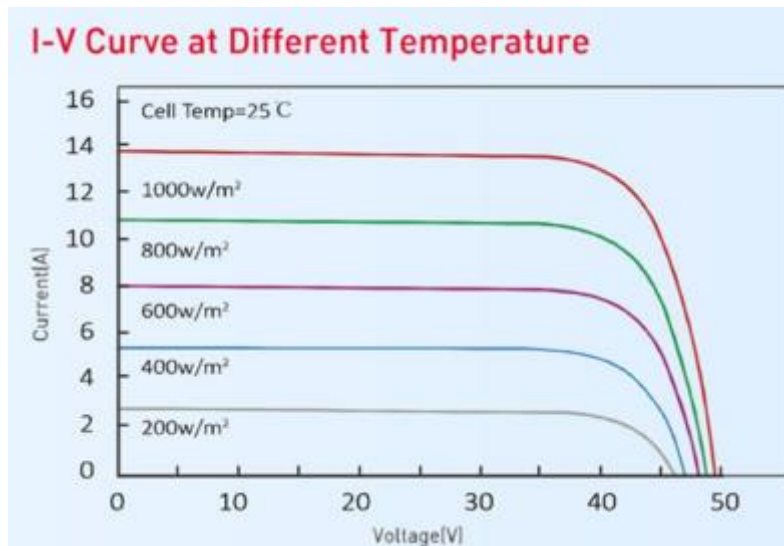
Quadro 4 - Especificação do módulo Honor Solar de 550W (modelo HY- M10/144H-550W).

Maximum Power	Pmax [W]	550
Maximum Power Voltage	Vmp [V]	41,28
Maximum Power Current	Imp [A]	13,32
Open Circuit Voltage	Voc [V]	49,80
Shor Circuit Current	Isc [A]	14,01
Module Efficiency	[%]	21,5

Fonte: HONOR BRASIL, 2023.

A sua curva I-V para diferentes temperaturas é apresentada na Figura 56.

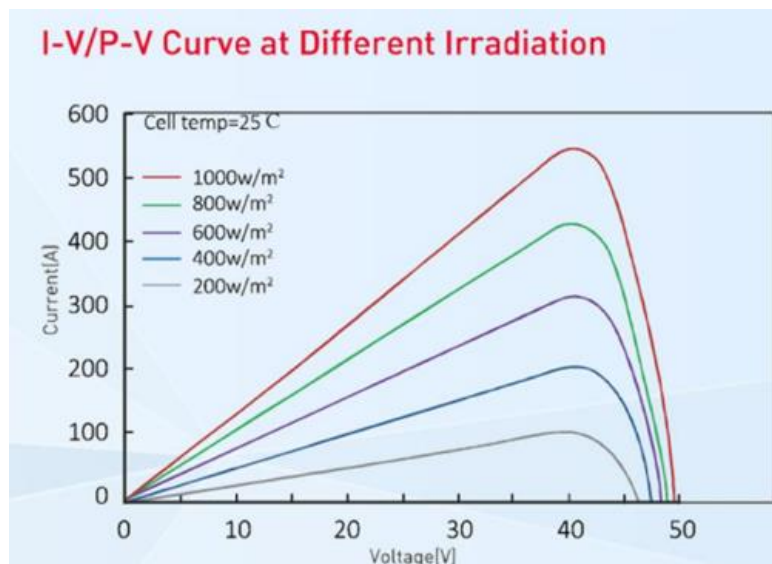
Figura 56 - curva I-V para diferentes temperaturas



Fonte: HONOR BRASIL, 2023.

Já sua curva P-V para diferentes irradiações é apresentada na Figura 57.

Figura 57 - curva P-V para diferentes irradiações.



Fonte: HONOR BRASIL, 2023.

No entorno do imóvel há outras instalações prediais em que o próprio terraço é utilizado para experimentos científicos, como visto na Figura 57. Hoje, mantendo-se a



poda das árvores e limpezas dentro dos padrões que já é feito pela UFSC, não vislumbra nenhum tipo de problema com sombreamento. No entanto, aproveitar das 2 entradas MPPT's existentes, aumenta a confiabilidade do sistema em possíveis futuras implementações prediais que possam gerar sombreamento em algumas *strings*. A disposição dos módulos é apresentada na Figura 58.

Figura 58 – Módulos fotovoltaicos

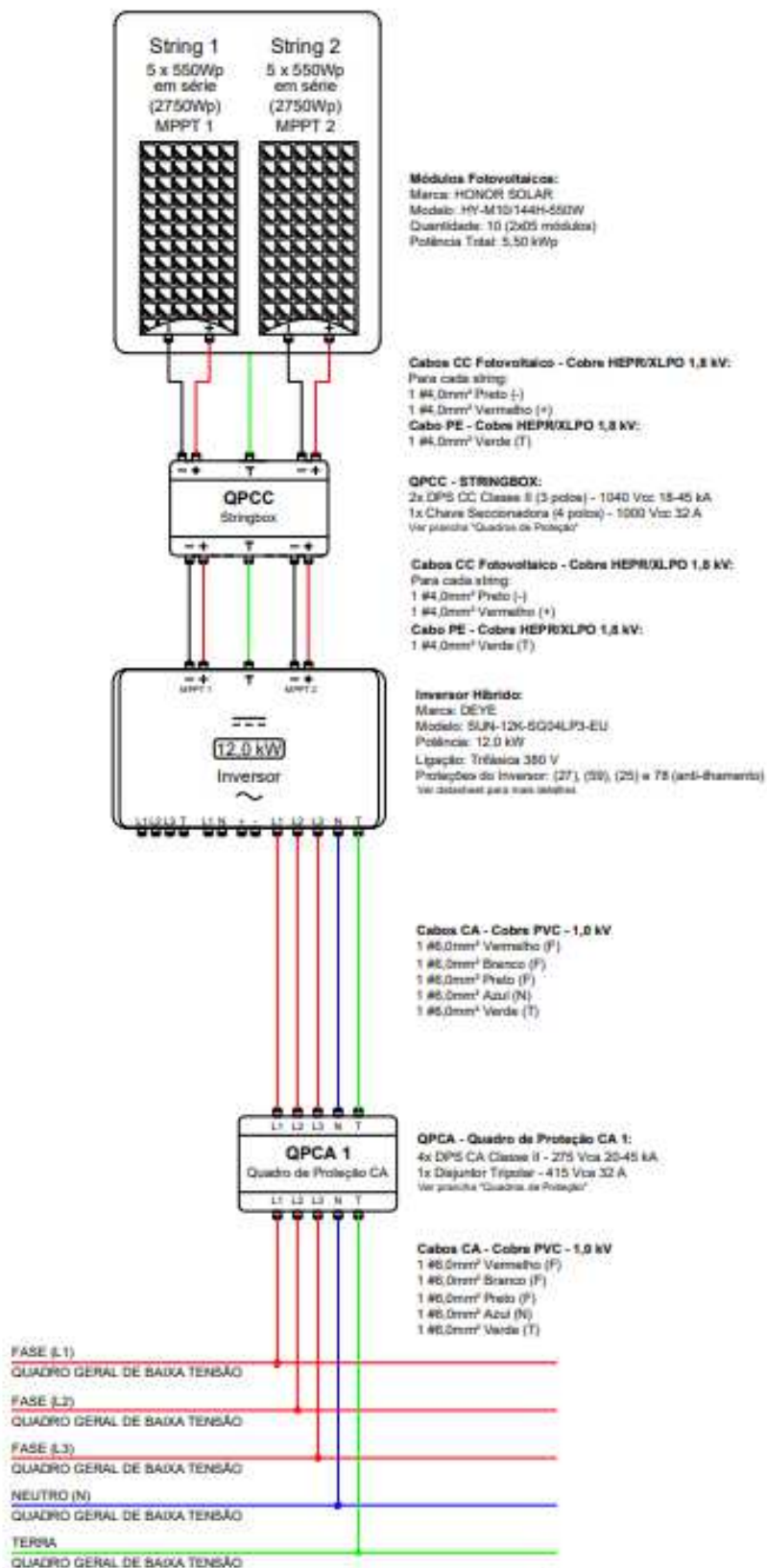


Fonte: Foto tirada pelo laboratório de inovação, 2024.

O sistema é composto por dez módulos da marca HONOR SOLAR, em seu desenvolvimento foi disposta em 2 *strings* de 5 módulos cada. Cada arranjo, *string*, possui uma potência individual de 2750 Wp. Tensão das duas *strings* são 249 V respeitando a faixa de 160 a 800 V, limite de operação do MPPT do inversor. Já a corrente do circuito do módulo é considerada como a corrente de curto circuito a ( $I_{sc}$ ) de 14,01 A.



Figura 59 - Strings



Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a Colméia Solar, 2024.

O módulo despacha energia ao inversor por corrente contínua. Essa corrente, considerando o pior caso, é de 14,01. Para que isto aconteça, faz-se necessário o dimensionamento dos condutores. Estes condutores foram especificados conforme a norma ABNT NBR 16612:2017 e ABNT NBR 5410:2004, sendo os trechos e dimensionamentos apresentados a seguir.

No trecho dos Módulos Fotovoltaicos até o Quadro de proteção CC os cabos CC são conduzidos, por meio de eletrodutos aparentes e cabos unipolares, sendo as classificações e fatores de correção:

- Seção Transversal do Cabo: 4 mm<sup>2</sup>
- Isolação: HEPR - Composto termofixo 90 °C
- Cobertura: XLPO/HEPR
- Método de Instalação: B1 (Cabos instalados ao ar livre – método 1)
- Temperatura ambiente: 50 °C
- Capacidade do cabo de 4 mm<sup>2</sup> com isolamento HEPR a 50°C: 28 A (Modo de instalação 1 e exposto ao sol)
- Fator de Agrupamento: 0,8 (2 circuitos)
- Capacidade do cabo (A) = 28 × 0,8 = 22,40 A

Aplicando-se os fatores de correção necessários, a capacidade de condução dos cabos fotovoltaicos de 4 mm<sup>2</sup> ficará reduzida para 22,40 A. Sendo assim, possui capacidade de condução maior que a corrente de curto-circuito dos módulos fotovoltaicos que é de 14,01 A. Dessa forma, optou-se por condutores de 4 mm<sup>2</sup> com isolamento dupla (1,8 kV) e proteção UV. A queda de tensão foi calculada baseado no maior comprimento de cabos, como as demais características dos cabos são idênticas, este será o caso mais crítico para a queda de tensão:

- Distância máxima: 0,02 km
- Resistência máxima a 90 °C: 6,490 Ω/km
- Corrente máxima: 14,01 A
- Tensão mínima: 412,8 V
- Queda de Tensão ( $\Delta V$ ) = 2 × 0,02 × 6,490 × 14,01 = 3,64
- Queda de Tensão (%) = 3,64/412,8 = 0,88%

Observa-se que a maior queda de tensão será de 0,88 %, dentro do recomendado de até 3% para condutores CC.

### 5.1.1 Quatro de Proteção de Corrente Contínua (QPCC)

O Sistema fotovoltaico mostrado inclui componentes essenciais como os DPS, uma chave seccionadora e conexões que levam ao inversor. O QPCC deveria ser um item obrigatório nos projetistas de sistemas fotovoltaicos, no entanto os próprios inversores possuem proteções internas como a 27, 59, 25 e 78.

- 27: Relé de subtensão, que desliga o inversor se a tensão cair abaixo de um valor especificado.
- 59: Relé de sobretensão, que desliga o inversor se a tensão exceder um valor especificado.
- 25: Relé de sincronismo, que garante que o inversor esteja sincronizado com a rede elétrica antes de conectar.
- 78: Relé Salto Vetor/deslocamento de fase/proteção contra falta de sincronismo.

Figura 60 - String Box Clamper 2040 V 2E 2S



Fonte: Tirada pelo autor desse trabalho, 2024.

Entretanto, em uma hipótese de um Sistema Fotovoltaico não contenha o QPCC e exista alguma sobretensão que avarie o sistema. O equipamento que sofrerá o dano será, diretamente, o inversor fotovoltaico. Nesta situação, o equipamento precisará ser substituído e passar por todo processo de recompra ou, na melhor das hipóteses, dentro da garantia aguardar os meses para substituição, entrega e

reinstalação do equipamento. Com um QPCC integrado no projeto, no caso de sobretensão com avaria no sistema, o equipamento que será danificado será o próprio QPCC. Que, neste caso, basta encontrar um numa distribuidora mais próxima que revenda o QPCC e em questão de dias, o Sistema Fotovoltaico estará em atividade normal.

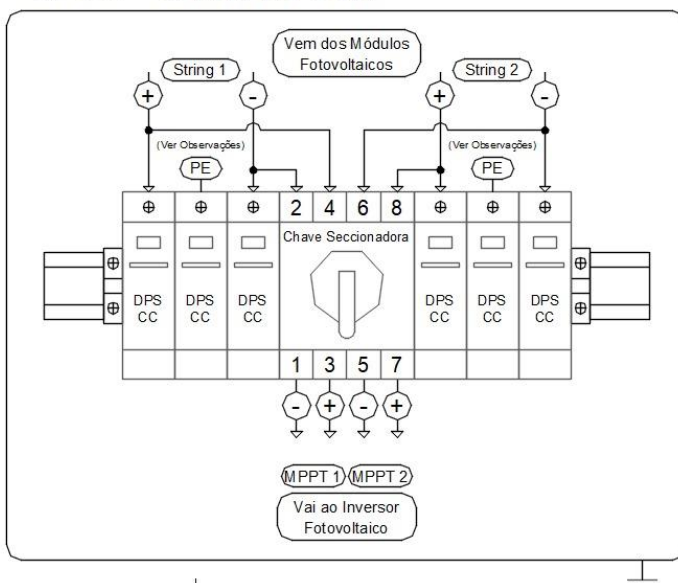
O diagrama esquemático da Figura 55 o sistema fotovoltaico mostrado na imagem inclui componentes essenciais como o DPS, uma chave seccionadora e conexões que levam ao inversor. Os módulos fotovoltaicos convertem a energia que passa pelos DPS e pela chave seccionadora para garantir proteção e controle. Existem três classes principais de DPS:

- Classe I: Projetados para instalações com risco elevado de descargas atmosféricas.
- Classe II: Usados em sistemas elétricos em ambientes residenciais e comerciais.
- Classe III: Destinados à proteção de equipamentos sensíveis em ambientes controlados

A chave seccionadora do projeto é de Classe II. Um dispositivo crucial em sistemas elétricos, especialmente em instalações fotovoltaicas, pois permite isolar partes do circuito, interrompendo o fluxo de corrente para garantir segurança durante a manutenção ou em emergências. Ela facilita o desligamento de seções específicas do sistema, evitando a necessidade de desativar toda a instalação, o que minimiza interrupções e aumenta a eficiência dos reparos. Além disso, protege o sistema ao isolar áreas afetadas em caso de falhas ou sobrecargas. Existem chaves seccionadoras manuais, operadas por intervenção humana, e automáticas, que respondem a condições específicas, proporcionando uma camada adicional de proteção. Em sistemas fotovoltaicos, a chave seccionadora desconecta os módulos solares do restante do sistema, permitindo intervenções seguras e controladas, sendo vital para a segurança elétrica e o funcionamento contínuo e seguro do sistema.

Figura 61 - QPCC Stringbox Módulos

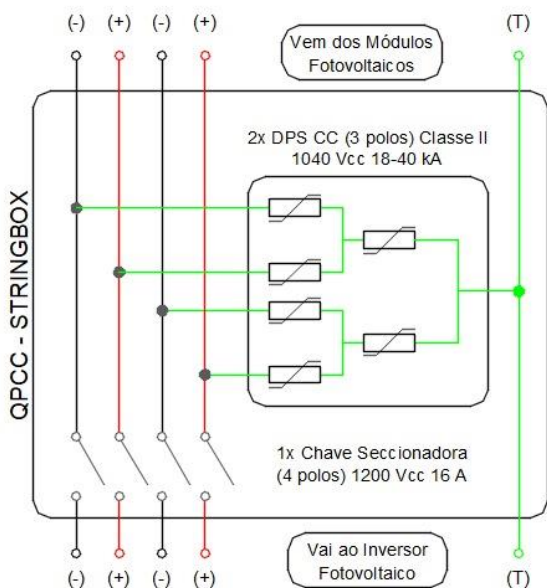
QPCC - STRINGBOX



Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar, 2024.

São 3 DPS por *string*. Já que os mesmos são conectados em cascata, sendo uma por condutor, e a saída dos dois condutores no 3º DPS. São 2 *strings*, logo são 6 DPS. Como apresentado no diagrama na Figura 62.

Figura 62 - Detalhadamente QPCC dos módulos



Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar, 2024.

Todos os cabos que serão utilizados na instalação são apropriados para seus fins, onde os cabos de força CC são próprios para instalações externas, suportar a ação de raios solares, ventos e variações de temperatura e os cabos CA são adequados para instalações elétricas internas a edificação.

Os condutores que levarão a corrente CC dos módulos fotovoltaicos até o inversor foram especificados conforme a norma ABNT NBR 16612:2017 e ABNT NBR 5410:2004, sendo o dimensionamento apresentados abaixo.

No trecho dos módulos fotovoltaicos até o QPCC os cabos CC são conduzidos por meio de eletrodutos aparentes e cabos unipolares, sendo as classificações e fatores de correção o mesmo do dimensionamento dos condutores no trecho dos Módulo Fotovoltaicos até o QPCC. Dessa forma, também se optou por condutores de 4 mm<sup>2</sup> com isolação dupla (1,8 kV) e proteção UV.

### 5.1.2 Quadro de Proteção de Corrente Alternada (QPCA)

Será instalado um quadro de proteção no lado CA conhecido QPCA.

Figura 63 - QPCA instalado



Fonte: Tirada pelo autor desse trabalho, 2024.

Os condutores que levarão a corrente CA do inversor até o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) foram especificados conforme a norma ABNT NBR 5410:2004, sendo os trechos e dimensionamentos apresentados abaixo.

Trecho do Inversor até o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT): Neste trecho os cabos CA são conduzidos da saída do inversor até o QGBT, por meio de eletrodutos aparentes e cabos unipolares, sendo as classificações e fatores de correção:

- Seção Transversal do Cabo: 6 mm<sup>2</sup>
- Isolação: PVC – 70°C
- Método de Instalação: B1 (Cabos unipolares em eletrodutos aparentes)
- Capacidade de corrente básica do cabo: 41 A (Método B1 com 3 condutores carregados)
- Fator de Correção por Temperatura: 0,94 (35° C)
- Fator de Agrupamento: 1 (sem agrupamento)
- Capacidade final do cabo (A) =  $41 \times 0,94 = 38,54$  A

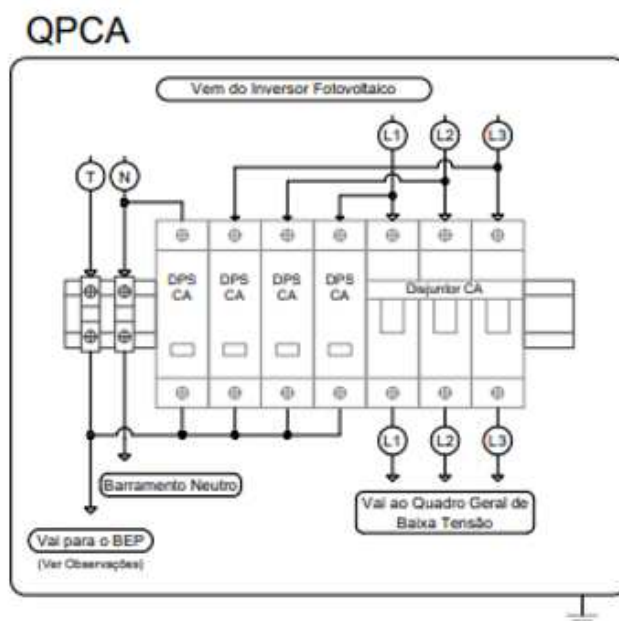
Aplicando-se os fatores de correção necessários, a capacidade de condução dos cabos de 6 mm<sup>2</sup> fica reduzida para 38,54 A. Considerando que a corrente no ponto de máxima potência é de 27,3 A por fase para os condutores do inversor e que os cabos do inversor serão conectados a um disjuntor tripolar com capacidade de corrente de 32 A, definiu-se que os condutores deste trecho devem possuir seção transversal de 6 mm<sup>2</sup> com isolamento de PVC instalados em eletrodutos aparentes.

A queda de tensão referente a saída em corrente alternada do secundário do transformador até o padrão de entrada é calculada abaixo:

- Distância máxima: 0,02 km
- Resistência máxima a 90° C: 3,9116 Ω/km
- Corrente máxima: 27,30 A
- Tensão: 380 V
- Queda de Tensão ( $\Delta V$ ) =  $0,02 \times \sqrt{3} \times 3,9116 \times 27,30 = 3,69$  v
- Queda de Tensão (%) =  $\frac{3,69}{380} = 0,97\%$

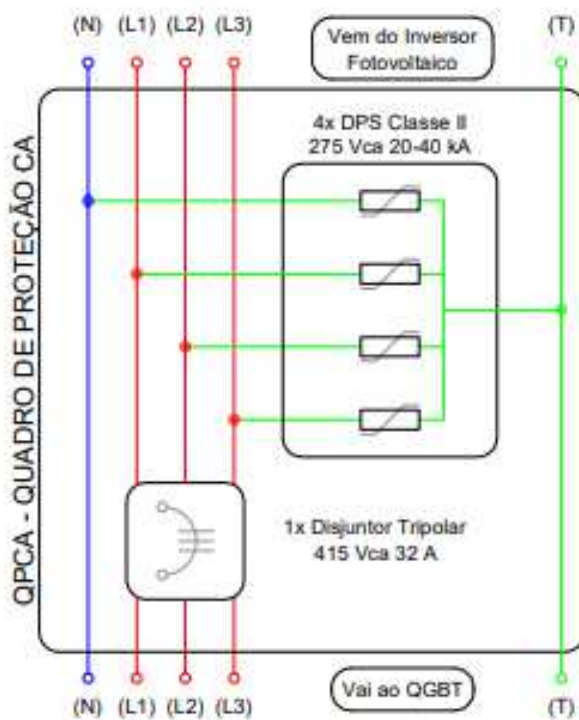
Observa-se que a queda de tensão será de **0,97 %**, de acordo com o recomendado na Especificação Técnica nº 122 da ENEL de até 3% para condutores CA.

Figura 64 - Quadro de proteção CA



Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar.

Figura 65 - QPCA - Quadro de proteção CA



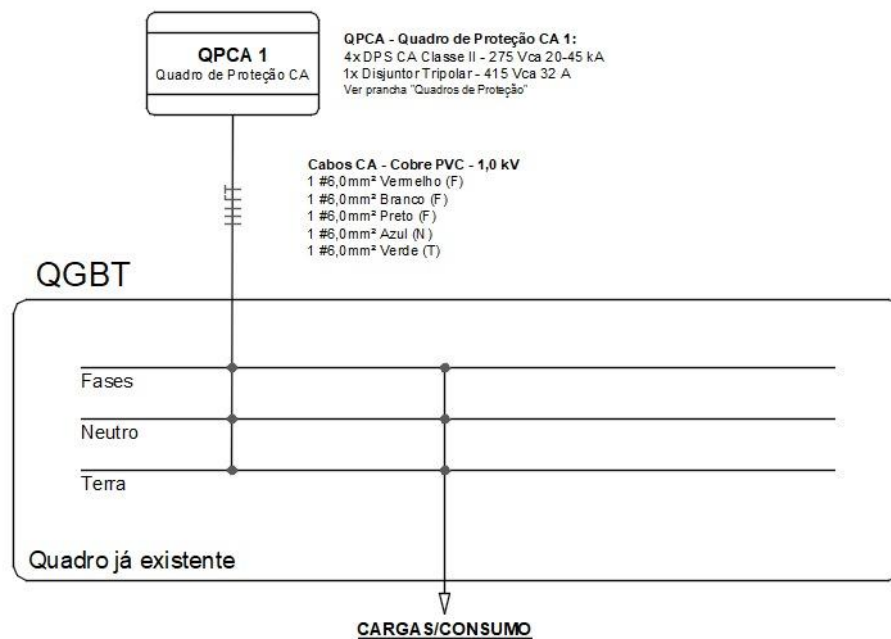
Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a Colméia Solar, 2024.



### 5.1.3 Ponto de Acoplamento a Rede

No trecho do QPCA até o QGBT levou-se em conta o mesmo dimensionamento apresentado acima. Dessa forma, também se optou por condutores de 6 mm<sup>2</sup> com isolamento de XLPE/EPR - 90°.

Figura 66 – Trecho QPCA até o QGBT



Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a Colméia Solar, 2024.

Para verificar as proteções e layout de instalação ver **Quadro de Proteção** basta acessar o Diagramas e pranchas referentes ao projeto da micrede nas referências.

## 5.2 INVERSOR

O inversor híbrido trifásico SUN-12K-SG04LP3-EU é uma solução avançada para sistemas de energia solar, oferecendo suporte para baterias de baixa tensão (48V) e garantindo segurança e confiabilidade. Este inversor suporta saída trifásica, o que amplia suas aplicações, e é compatível com geradores a diesel que representa uma conexão trifásica de frequência, além de possuir funções de operação paralela e gerenciamento avançado de baterias.

Figura 67 - Inversor híbrido Deye SUN-12K-SG04LP3-EU



Fonte: Datasheet, 2024.

O inversor é compatível com baterias de Li-Ion, com uma faixa de voltagem da bateria de 40~60V e corrente máxima de carga/descarga para a bateria é de 240A. A potência máxima de entrada CC é de 12,00 kW. Ele possui uma eficiência máxima de 97.60% e eficiência MPPT de 99.90%. As proteções integradas incluem proteção contra surtos de entrada do módulo, proteção anti-ilhamento, proteção contra polaridade reversa de entrada do módulo, detecção de resistência de isolamento, monitoramento de corrente residual, proteção contra sobrecorrente de saída, proteção contra curto-circuito de saída e proteção contra sobretensão de saída.

Quadro 5 - Proteções existentes

Código	Proteção
59	Sobretensão CA
27	Subtensão CA
81 O/u	Sobre Sub Frequência
25	Check de Sincronismo
78	Anti-ilhamento
81 Df/dt	Relé Anti-ilhamento
50/51 ou 50/51N	Sobrecorrente de fase e de neutro, instantâneas e temporizadas

Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar, 2024.

Quadro 6 - Características técnicas do inversor Características técnicas do inversor.

Fabricante	DEYE
Modelo	SUN-12K -SG04LP3-EU
Quantidade	1
Entrada	
Potência nominal – Pn [kW]	12,00
Máxima potência na entrada CC – Pmax-cc [kW]	15,60
Máxima tensão CC – Vcc-máx [V]	800
Máxima corrente CC – Icc-máx [A]	16
Máxima tensão MPPT – Vpmp-máx [V]	350
Mínima tensão MPPT – Vpmp-min [V]	650
Tensão CC de partida – Vcc-part [V]	160
Quantidade de entradas por MPPT	1
Quantidade de MPPTs	2
Saída	
Potência nominal CA – Pca [kW]	6,0
Máxima potência na saída CA – Pca-máx [kW]	12,00
Máxima corrente na saída CA – Imáx-ca [A]	27,3
Tensão nominal CA – Vnon-ca [V]	380
Frequência nominal – Fn [Hz]	60
Máxima tensão CA – Vca-máx [V]	300
Mínima tensão CA – Vca-min [V]	160
THD de corrente [%]	<3,0
Fator de potência	1 (Ajustável)
Tipo de conexão – número de fases + neutro + terra	F+F+F+N+T
Mínima tensão CA – Vca-min [V]	160
THD de corrente [%]	<3,0
Fator de potência	1 (Ajustável)
Tipo de conexão – número de fases + neutro + terra	F+F+F+N+T
Eficiência máxima [%]	97,60
Bateria	
Tipo de Bateria	Lead-acid or Li-Ion
Faixa de Tensão da Bateria (V)	40~60
Corrente Máxima de Carregamento (A)	240
Corrente Máxima de Descarga (A)	240
Sensor de Temperatura Externo	Sim
Curva de Carregamento	Equalização de 3 estágios

Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar, 2024.

O inversor atende a diversas certificações e normas, incluindo CEI 0-21, VDE-AR-N 4105, NRS 097, IEC 62116, IEC 61727, G99, G98, VDE 0126-1-1, RD 1699,

C10-1123, IEC/EN 61000-6-1/2/3/4, IEC/EN 62109-1 e IEC/EN 62109-24. Ele opera em uma faixa de temperatura de  $-45\sim 60^{\circ}\text{C}$ , com *derating* (a redução da capacidade nominal de um dispositivo) acima de  $60^{\circ}\text{C}$ , e possui refrigeração inteligente. O nível de ruído é inferior a 45 dB. A comunicação com o BMS é feita via RS485 e CAN. O inversor contém grau de proteção IP65 e estilo de instalação montado na parede.

O inversor fotovoltaico é o equipamento que possui compatibilidade para comunicar-se com BMS da bateria. Existe saída CA para cargas e é híbrido pois possui a capacidade de geração extra, como a implementação de um gerador diesel. Esta compatibilidade de geração a diesel, trifásica, permite neste estudo alterá-lo e inserir o emulador eólico representado pelo moto-gerador. No caso, aqui, existe alguns marcos, a conexão e integração com a bateria, a adaptação para conexão com o sistema que emule um gerador eólico e a conexão de cargas, futuramente, inteligentes.

O inversor foi desenvolvido para cumprir todas as normas brasileiras referentes à conexão em modo de paralelismo constante, incluindo o PRODIST, e para se conectar às redes de todas as concessionárias no Brasil. Ele atende, sem limitações, às especificações e parâmetros elétricos necessários para o funcionamento adequado do sistema. Agora é possível definir suas especificações técnicas no Quadro 7.

Quadro 7 - Datasheet inversor referente a bateria

Modelo	SUN-12K-SG04LP3-EU
Tipo da Bateria	Lead-acid ou Li-Ion
Variação da tensão (V)	240
Corrente máxima de recarga (A)	240
Corrente máxima de descarga (A)	240
Sensor de temperatura externo	Sim
Curva de carregamento	Equalização com 3 estágios

Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar, 2024.

Ele suporta uma corrente máxima de carga e descarga de 240 A e inclui um sensor de temperatura externo. A curva de carga é composta por três estágios com equalização, e a estratégia de carga para baterias de íon de lítio adapta-se automaticamente ao sistema de gerenciamento da bateria (BMS), garantindo eficiência e segurança no gerenciamento da energia.

Quadro 8 - Datasheet inversor referente aos módulos

Entrada CC	
Máxima Potência CC de Entrada (W)	15600
Faixa Te tensão de Entrada (V)	550 (160~800)
Tensão de Start (V)	160
Faixa de Tensão do MPPT (V)	200-650
Faixa de tensão DC em Carga Total (V)	350-650
Corrente de Entrada (A)	26+13
Corrente de Curto-Circuito (A)	34+17
Número de MPPT's/Strings por MPPT	2/2+1

Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar, 2024.

Os módulos fotovoltaicos compatíveis com o modelo SUN-12K-SG04LP3-EU apresentam uma potência máxima de entrada CC 12 KWp, com uma tensão nominal de entrada de 550V, operando dentro de uma faixa de 160V a 800V. A tensão de partida é de 160V, enquanto a faixa de tensão MPPT está entre 200V e 650V. Em condições de carga completa, a faixa de tensão CC varia de 350V a 650V. A corrente é de até 13 A por *string*, com uma corrente máxima CC ( $I_{sc}$ ) de até 17A por *string*. O sistema suporta por *string*, garantindo por MPPT a otimização da produção de energia em diferentes condições de operação. Essas especificações são cruciais para assegurar a compatibilidade e o desempenho eficiente do sistema fotovoltaico, permitindo uma integração adequada com outros componentes do sistema de energia solar.

Quadro 9 - Datasheet inversor referente a Saída CA

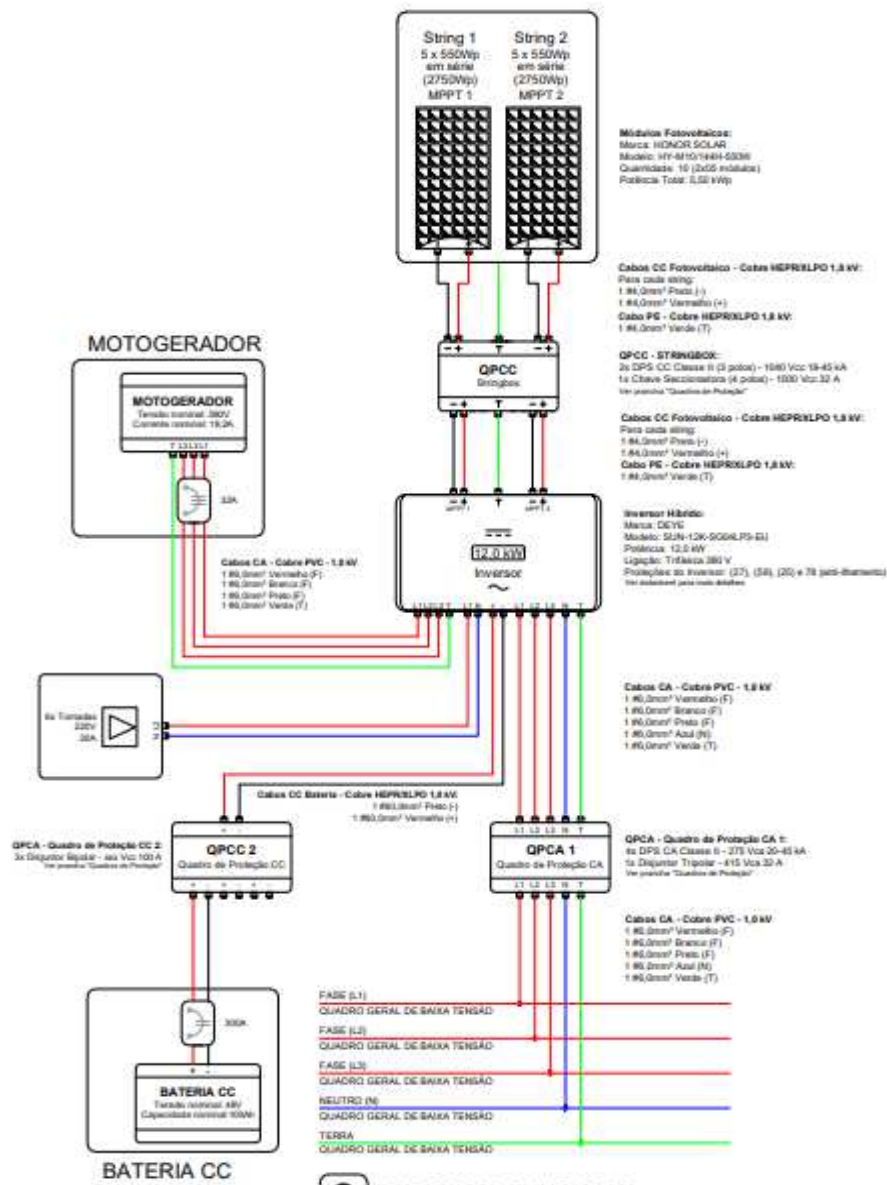
AC Output Data					
Rated AC Output and UPS Power (W)	5000	6000	8000	10000	12000
Max. AC Output Power (W)	5500	6600	8800	11000	13200
AC Output Rated Current (A)	7.6	9.1	12.1	15.2	18.2
Max. AC Current (A)	11.4	13.6	18.2	22.7	27.3
Max. Continuous AC Passthrough (A)	45				
Peak Power (off grid)	2 time of rated power, 10 S				
Power Factor	0.8 leading to 0.8 lagging				
Output Frequency and Voltage	50/60Hz; 3L/N/PE 220/380, 230/400Vac				
Grid Type	Three Phase				
DC injection current (mA)	THD<3% (Linear load<1.5%)				

Fonte: Retirado do Datasheet do Inversor, 2024.

Configurações referentes a saída CA de potência nominal de saída de 12000 watts, com uma potência máxima de saída CA que vai a 13200 watts. A corrente nominal de saída CA é de 18,2 amperes, enquanto a corrente máxima é de 27,3 amperes. Este inversor suporta um fator de potência que vai de 0.8 adiantado a 0.8 atrasado, e opera em frequências de 50/60Hz com tensões de saída de 230V e 230/400Vac em uma rede trifásica. Além disso, a corrente de injeção CC é mantida abaixo de 3% de THD, garantindo uma operação eficiente e estável, mesmo com cargas lineares abaixo de 1.

Para especificações técnicas e certificação ou declaração de conformidade ver Anexo IV - Datasheet Inversor e Anexo V - Registro Inmetro Inversor no link dos Diagramas e pranchas referentes ao projeto da microrede.

Figura 68 – Diagrama Multifilar



Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com a Colméia Solar, 2024.

O diagrama multifilar mostra as conexões de um inversor de parede, convertendo a CC das *strings* fotovoltaicas, despachando tanto para da bateria, ou cargas CA, ou até mesmo para rede compensá-la futuramente com créditos. Há a conexão com o moto-generador que é o emulador de uma fonte eólica no sistema. Duas strings de módulos fotovoltaicos, cada uma com 5 módulos de 550Wp conectados em série, fornecem energia ao inversor. A bateria armazena energia em CC e está conectada ao inversor para fornecer energia quando necessário.



Os quadros de proteção são essenciais para a segurança do sistema. O QPCC protege os circuitos de CC provenientes das *strings* fotovoltaicas e da bateria, incluindo dispositivos de proteção como disjuntores e para evitar sobrecargas e curtos-circuito. O QPCA 1 protege os circuitos de CA que saem do inversor, contendo dispositivos de proteção como disjuntores e fusíveis para a parte do sistema que opera em CA. As tomadas no diagrama representam os pontos de conexão onde a energia convertida pelo inversor pode ser utilizada por diferentes dispositivos ou sistemas, garantindo segurança e compatibilidade.

O QPCC 2 é um quadro adicional para proteção da bateria. Ela é composta pelos respectivos disjuntores e barramento e foi formulada para possibilidade de inserção de mais baterias, caso desejado, garantindo uma proteção mais segmentada e eficiente.

### 5.3 BATERIA

Baixa incidência solar e ventos fracos geram uma natureza intermitente das fontes como eólica e solar em muitas vezes não coincide com a demanda. Importância crucial da capacidade de armazenamento de energia para garantir a continuidade do fornecimento de energia. Os sistemas de armazenamento, como as baterias, têm um papel fundamental nesse cenário, permitindo que o excedente de energia seja devidamente armazenado desempenhando, assim, um papel vital para na mitigação de problemas relacionados à intermitência.

A bateria é de tecnologia lítio ferro-fosfato,  $\text{LiFePO}_4$ . As células eletroquímicas de íons de lítio são distinguidas por sua elevada densidade energética, eficácia operacional e extensa durabilidade cíclica. Estas características distintivas posicionaram as células de íons de lítio como as principais fontes de energia para aplicações em dispositivos eletrônicos de consumo. Adicionalmente, antecipa-se que estas células desempenharão um papel significativo no contexto de sistemas de armazenamento eletroquímico para instalações de geração de energia renovável e também como soluções energéticas para a mobilidade sustentável, incluindo veículos híbridos e elétricos (Scrosati; Garche, 2010).

A bateria a qual será necessário implementar junto com o sistema fotovoltaico e eólico é o da empresa Unipower da família UPLFP48. As especificações são: tensão nominal de 48 V, capacidade nominal de 100 Ah, dimensões de 442 x 520 x 205 mm, peso aproximado de 56,0 Kg, a tensão de operação de 42 V a 54 V, tensão de carga de 53,4 V a 54,0 V, corrente máxima de recarga contínua de 30 A, corrente máxima de descarga contínua de 100 A, corrente máxima de descarga em pulso de 100 A por 50 segundos e tensão de corte de 42 V.

Já as condições operacionais são: vida útil cíclica de 4000 ciclos. Eficiência de recarga de 98%. Temperatura operacional: Para descarga, de -20°C até 45°C; para recarga, de 0°C até 45°C. Temperatura de armazenamento: De 0°C até 45°C. Tempo de armazenamento: 12 meses a 20°C. Padrão de segurança: UL1642 no nível de célula. O Padrão de segurança UL1642 estabelece testes rigorosos e requisitos para garantir que essas baterias atendam a padrões de segurança rigorosos. Seu objetivo é reduzir os riscos de explosão, incêndio e lesões associados ao uso de baterias de lítio (Shen, 2022).

As baterias de lítio ferro fosfato (LiFePO<sub>4</sub>) destacam-se por sua longa vida útil. Essa durabilidade as torna ideais para sistemas de backup de energia, onde a confiabilidade é crucial. Além disso, a otimização da performance é alcançada através de um sistema inteligente de gerenciamento de células, que monitora e controla as condições de carga e descarga, temperatura das células e outros parâmetros vitais, assegurando o melhor estado de saúde da bateria.

A análise e controle da performance da bateria são facilitados por um sistema abrangente de monitoramento, que permite a exportação de dados para computadores, possibilitando a supervisão e análise em tempo real. A vida útil da bateria é maximizada pelo módulo inteligente de balanceamento de células, que mantém a consistência da capacidade. O controle do estado de funcionamento é acessível através do painel frontal, que exibe o estado de carga (SOC), status de funcionamento e alarmes. Operando em uma ampla faixa de temperatura, de -20°C a +70°C, e com total compatibilidade com equipamentos de comunicação, essas baterias são uma solução robusta e versátil para diversas aplicações.

A bateria também abrange a seguintes referências normativas:

- BNT NBR 16145: Especificação para acumuladores lítio-ion em aplicações estacionárias de 48 VCC.

- Telcordia Technologies Generic Requirements GR-3150-CORE: Requisitos genéricos para baterias de lítio não aquosas secundárias.
- IEC 62620: Norma para células e baterias secundárias de lítio para uso em aplicações industriais

Figura 69 - Bateria da Unipower da Família UPLFP48 de LiFePO4



Fonte: Datasheet do equipamento, 2024.

Possui sistema de gerenciamento da bateria (Battery Management System - BMS) com proteção de tensão que interrompe a recarga se a tensão de qualquer célula ou a tensão total do sistema exceder os limites pré-estabelecidos. Essa medida de segurança previne danos por sobrecarga. A proteção é desativada automaticamente e a recarga pode ser retomada quando as tensões retornam aos valores normais aceitáveis. Proteção contra sobre descarga, que interrompe a descarga se a tensão de qualquer célula ou a tensão total do sistema cair abaixo de um limite pré-estabelecido. Essa medida de segurança previne danos às células por descarga excessiva. Quando as tensões retornam aos valores normais, o BMS automaticamente desativa a proteção, permitindo a retomada da descarga normal. Essa característica é essencial para manter a integridade e a longevidade da bateria.

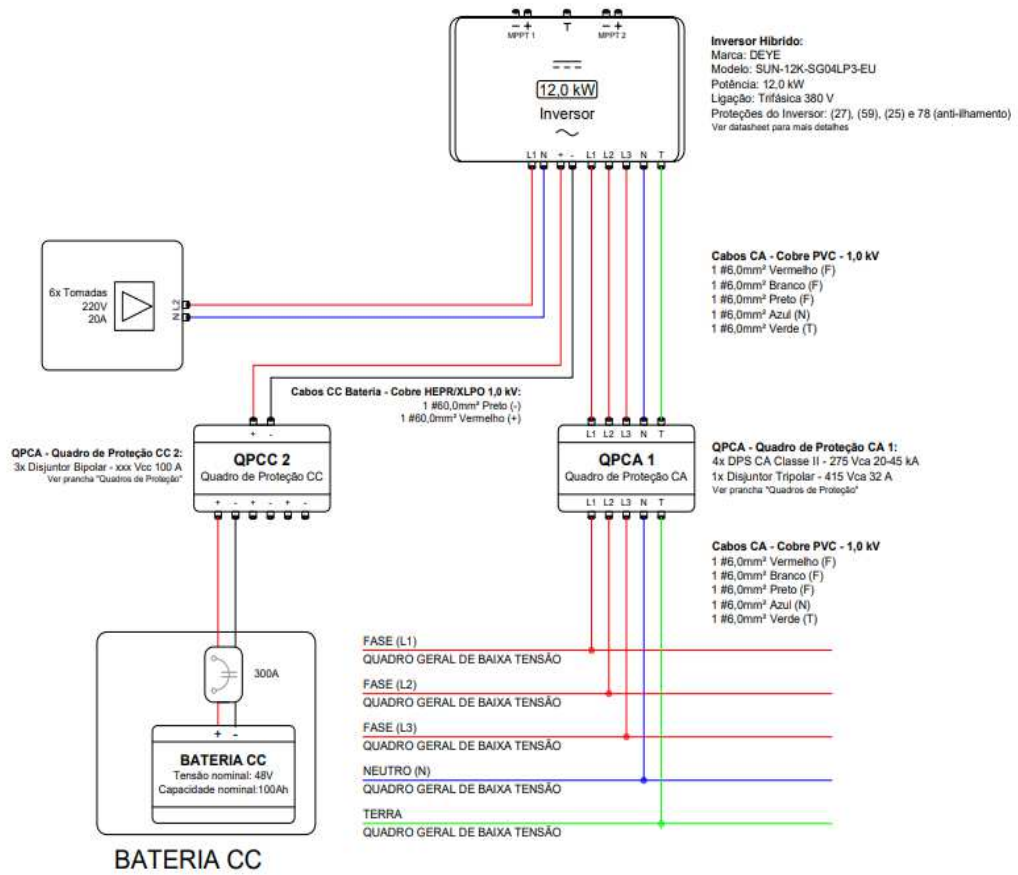
Com proteção de sobrecorrente, quando a corrente de recarga excede o limite ajustado e o tempo de sobrecorrente é maior do que o limite definido, o sistema entra em modo de proteção e desabilita a recarga. O sistema tenta sair desse modo a cada 60 segundos. Além disso, a proteção contra sobrecorrente ajuda a prolongar a vida útil dos equipamentos e reduzir os custos de reparo e substituição. Com proteção de

limite de corrente de recarga. Durante a recarga, se a corrente de recarga for superior ao valor máximo ajustado, o BMS irá limitar a corrente de recarga para um valor inferior ao limite ajustado. Com proteção de curto-circuito. Quando a corrente de descarga excede o limite ajustado, o sistema entra em modo de proteção e desliga a descarga. No entanto, ele não se recupera automaticamente; a carga deve ser removida ou a bateria deve entrar em recarga para reativar o sistema. Com proteção contra inversão de polaridade. Quando a bateria e o retificador estão conectados com polaridade invertida e atingem o tempo ajustado, o sistema entra em modo de proteção e desliga a descarga. No entanto, ele não se recupera automaticamente.

Com proteção de temperatura. Crucial para garantir o funcionamento seguro das células. Existem sensores térmicos que monitoram a temperatura das células. Se a temperatura de uma célula exceder 70°C ou cair abaixo de 0°C durante a recarga, o BMS interrompe a recarga para evitar danos. Da mesma forma, se a temperatura de uma célula for superior a 75°C ou inferior a -20°C durante a descarga, o BMS também interrompe a operação para proteger a célula. Com proteção de temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente excede 70°C ou cai abaixo de 0°C durante a recarga, o BMS interrompe a recarga para evitar danos. A bateria possui um sensor térmico que monitora a temperatura da PCB. Se essa temperatura exceder 95°C, o BMS ativa a proteção e interrompe a recarga ou descarga até que a temperatura retorne à faixa normal de operação.

Com equalização de células é fundamental para maximizar a capacidade de armazenamento e a vida útil das baterias. Durante a recarga, se a tensão de todas as células for superior a 3,40 V e a diferença de tensão entre as células ( $\Delta U$ ) for maior que 40 mV, o BMS ativa o processo de equalização. Nesse caso, a corrente de equalização é ajustada com base na capacidade de cada célula. O objetivo é igualar a carga de todas as células, minimizando desequilíbrios e prolongando a eficiência do sistema. O diagrama abaixo apresenta a bateria conectada ao sistema e pode ser visto na Figura 70.

Figura 70 - Bateria conectada ao sistema



Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a empresa Colméia Solar, 2024.

Figura 71 - Bateria conectada ao sistema



Fonte: Tirada pelo autor desse trabalho, 2024.

Figura 72 - Disjuntor do QPCC 2



Fonte: Tirada pelo autor desse trabalho, 2024.



Figura 73 - Barramento CC



Fonte: Tirada pelo autor desse trabalho, 2024.

Foi inserido um segundo QPCC, conforme Figura 72, que é representada pelo disjuntor de 250 para a bateria de  $\text{Li3Po4}$  e o respectivo barramento construídos pelo Gabriel Monteiro e pelo Adulai. Já a Figura 73, mostra o barramento do rack de baterias conectadas.

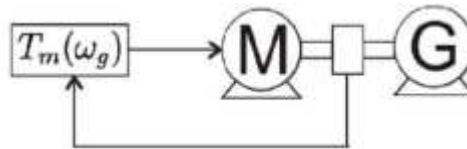
#### 5.4 EMULADOR EÓLICO

Os requisitos de projeto representam uma exigência do laboratório de inovação composta de uma integração de fonte de energia solar com o emulador eólico, e sistema de armazenamento para estudos futuros. Conforme Figura 74, sendo que o sistema eólico é representado por um emulador que é composto por um gerador W22



que recebe trabalho aplicado pelo motor (M) a qual é acionado inversor CFW11 Entre, o motor e o gerador, há o torquímetro (Puhl, 2020).

Figura 74 - Modelo de emulação com um motor M, um sensor de torque, um gerador G



Fonte: Puhl, 2020.

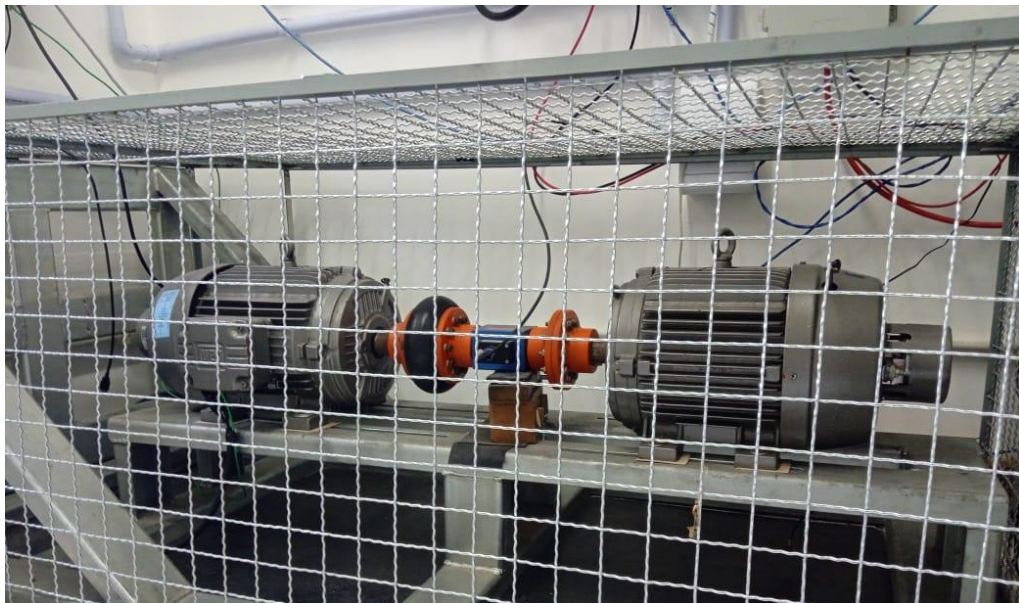
O inversor CFW11 é uma peça tecnológica avançada projetada para oferecer controle preciso e eficiente de motores. Com uma fonte de alimentação que varia de 380 a 480 V, ele é capaz de controlar a velocidade do motor desde o zero até sua velocidade nominal, graças ao controle vetorial sensorless. Isso significa que o inversor pode ajustar a velocidade do motor sem a necessidade de sensores externos, o que simplifica a instalação e a manutenção.

Além disso, o CFW11 possui uma Interface de Operação Remota (HMI) o que facilita a interação do usuário com o dispositivo. Os indutores melhoram a mitigação harmônica, garantindo um funcionamento mais estável e seguro. O inversor é compatível com uma ampla gama de protocolos de comunicação e acessórios, como Profibus, DeviceNet, CANopen, Ethernet/IP, Modbus-RTU e Profinet, tornando-o versátil e adaptável a diferentes sistemas industriais. O CFW11 é adequado para uma variedade de ambientes e cargas, reforçando sua flexibilidade e confiabilidade.

Já o motor W22 Magnet é uma solução de alta eficiência e robustez para aplicações industriais que demandam confiabilidade e desempenho. Com uma saída de 40 HP e velocidade de 3600 rpm, este motor se destaca por sua massa de apenas 168 libras e volume de 1464 polegadas cúbicas, garantindo uma eficiência impressionante de 94.1%. A estrutura do motor é otimizada para reduzir a dispersão de ar e melhorar a refrigeração. Além disso, a base sólida simplifica o alinhamento e a instalação do motor, e a construção robusta em ferro fundido oferece alta resistência mecânica e baixos níveis de vibração.

A segurança e a durabilidade do motor W22 Magnet são reforçadas por características como a proteção térmica com termistores embutidos nas bobinas, que protegem completamente contra o superaquecimento causado por sobrecarga e variações de tensão. Os ímãs permanentes utilizados são feitos de uma combinação poderosa de neodímio, ferro e boro (NdFeB), conhecidos como ímãs de terras raras, que são dezenas de vezes mais fortes que os ímãs de Ferrite tradicionais e são revestidos com uma camada protetora de epóxi para maior resistência mecânica e à corrosão. Os motores também estão equipados com rolamentos que oferecem uma vida útil de até 100.000 horas e contam com tampas de extremidade com bicos de graxa que permitem a relubrificação para prolongar a vida do motor. A composição do motor W22 e do inversor CFW11 representam o emulador de sistema fotovoltaico, conforme Figura 75.

Figura 75 – O moto-gerador



Fonte: Tirada pelo autor desse trabalho, 2024.

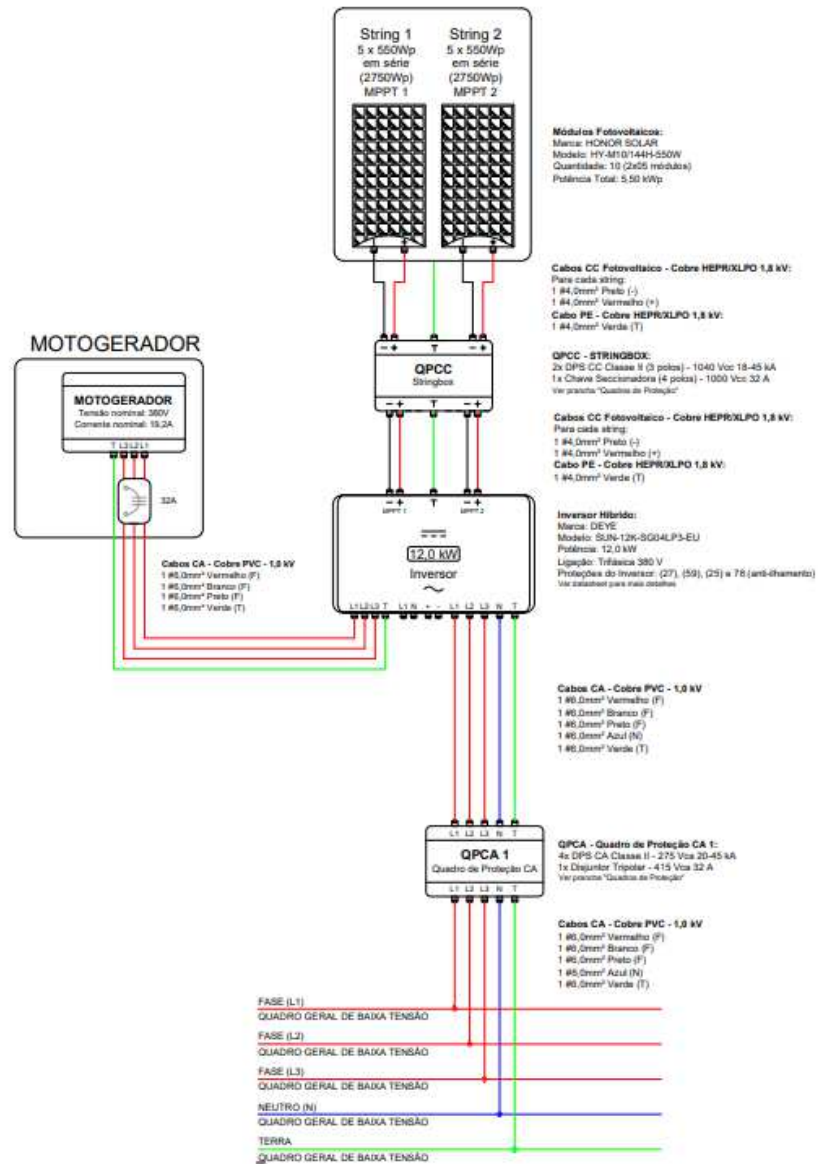
Esse emulador é apresentado por Puhl (2020), como os componentes da bancada são utilizados na emulação:

- Motor de Ímãs Permanentes com fluxo radial
  - Tensão: 380 V;
  - Potência: 11 kW;

- Velocidade máxima: 1800 RPM;
- Torque máximo: 5,9 kg.f.m;
- Peso: 50 kg;
- Número de polos: 6;
- Gerador de Ímãs Permanentes com fluxo radial
  - Tensão: 380 V;
  - Potência: 15 kW;
  - Velocidade máxima: 1800 RPM;
  - Torque máximo: 8,12 kg.f.m;
  - Número de polos: 6;
- Inversor CFW 11 WEG
  - Tensão de entrada: 380 - 480 V;
  - Potência: 2 - 600 cv;
  - Protocolo para acionamento: Modbus-RTU;
  - Módulo de comunicação serial: Kit RS232-01

Na perspectiva deste trabalho o emulador do gerador eólico fica a cargo do inversor CFW que representa o equipamento por qual os dados que emulam inúmeros cenários de geração eólica entregam o toque necessário para geração elétrica a qual é absorvido pelo inversor e despachado conforme o algoritmo supervisor.

Figura 76 - Emulador do gerador eólico



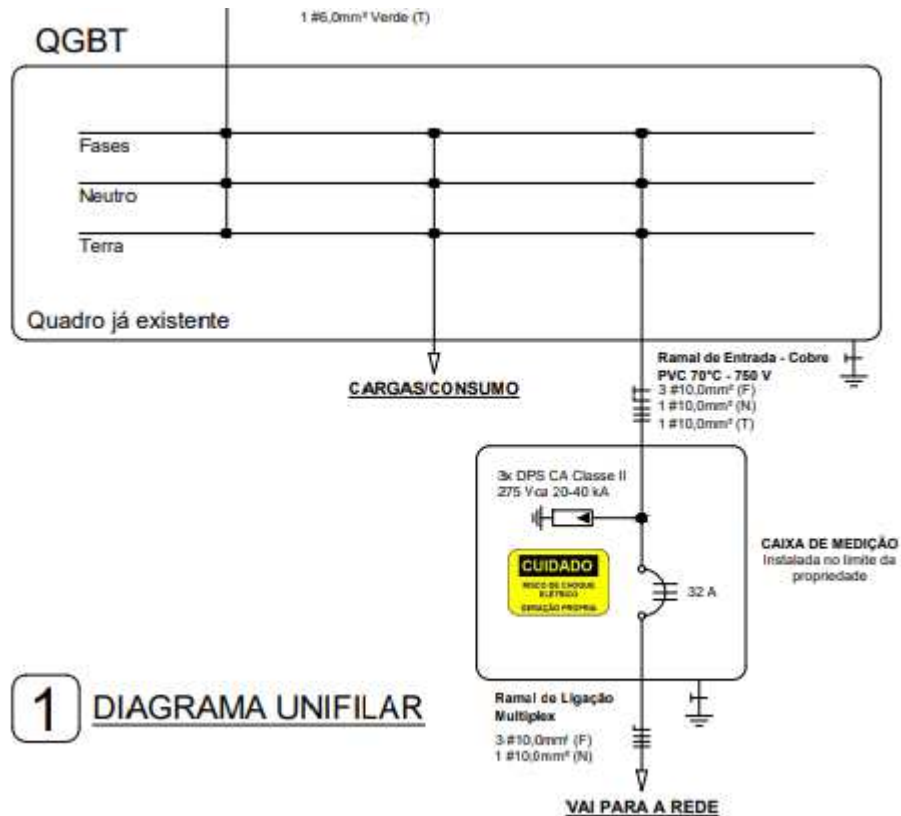
Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a empresa Colméia Solar, 2024.

A figura 76 apresenta a conexão com o emulador eólico. Uma conexão trifásica mais o aterramento conectado ao BEP. Nele é visto o disjuntor de 32 A, respeitando a margem de 25% de segurança.

## 5.5 PONTO DE CONEXÃO COM A REDE

A Figura 77 é um diagrama unifilar elétrico que mostra a configuração de uma instalação elétrica, destacando o disjuntor do padrão de entrada, os DPS's, secção transversal dos condutores e suas conexões

Figura 77 – Diagrama Unifilar



Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho com base nos dados fornecidos pela empresa Colméia Solar, 2024.

O diagrama unifilar representa a distribuição elétrica de uma instalação. No topo, vemos o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) com três fases (L1, L2, L3) e um neutro (N), além de uma conexão de aterramento (T) para segurança. Abaixo, há um quadro de distribuição já existente, conectado ao QGBT. No meio do diagrama, encontramos a caixa de medição, conectada ao QGBT com fios de cobre especificados como 3x10mm<sup>2</sup>(F) para as três fases F) + 1x10mm<sup>2</sup>(N) para o neutro. Já para o ramal de entrada 3x10mm<sup>2</sup>(F) para as três fases + 1x10mm<sup>2</sup>(N) para o neutro e o condutor de aterramento de 1x10mm<sup>2</sup>. (T)

Diferentes componentes como disjuntores, DPS's e as respectivas conexões. Este diagrama é essencial para o planejamento de novas instalações elétricas, pois facilita a identificação de componentes e conexões durante a manutenção, além de garantir que todas as conexões estejam corretamente aterradas e protegidas. Conforme orientação das normas de atendimento da CELESC, conforme Figura 78.

Figura 78 - Normas de atendimento da CELESC

Tipo e Tensão	Categoria	Carga Total Instalada na Unidade Consumidora (kW)	Demanda (kVA)	Proteção Geral Disjuntor (A)		Número de		Ramal de Ligação e Carga		Ramal de Entrada e Saída		Condutor de Proteção Aterramento	Eletroduto		Pontaletes de Ferro Galvanizado	
				IEC/DIN	NEMA	Fases	Fios	Aéreos multiplexados		Método de Instalar embutido (B1) ou subterrâneo (D) NBR 5410 - Cobre			Cobre	Aparente ou embutido em alvenaria		Subterrâneo
								Cobre	Alumínio	XLPE/HEPR /EPR 90°C	Isolação PVC 70°C					
Monofásico 220 V Ver nota 7	A1	$0 < C \leq 8$		40	40	1	2	10	10	10	10	10	3/4	1	1 1/2	
	A2	$8 < C \leq 11$		50	50	1	2	10	10	10	10	10	3/4	1	1 1/2	
	A3	$11 < C \leq 13$		63	60	1	2	10	10	10	16	10(16) <sup>4</sup>	3/4(1) <sup>5</sup>	1	1 1/2	
	A4	$13 < C \leq 15$		70	70	1	2	10	16	10	16	10(16) <sup>4</sup>	3/4(1) <sup>5</sup>	1	1 1/2	
Monofásico 440/220 V Ver Nota 7	M1	$0 < C \leq 17$		50	50	1	3	10	10	10	10	10	1	1 1/2	1 1/2	
	M2	$17 < C \leq 22$		63	60	1	3	10	10	10(16) <sup>4</sup>	16	10(16) <sup>4</sup>	1	1 1/2	1 1/2	
	M3	$22 < C \leq 30$		70	70	1	3	10	16	16	25	16	1 1/4	1 1/2	NÃO	
	M4	$30 < C \leq 40$		80/90 <sup>1,9</sup>	90 <sup>1</sup>	1	3	16	25	25	35	16	1 1/4	1 1/2	NÃO	
	M5	$40 < C \leq 50$		100 <sup>1,3</sup>	100 <sup>1,3</sup>	1	3	16	25	25	35	16	1 1/4	1 1/2	NÃO	
Bifásico 380/220V Ver nota 7	B1	$15 < C \leq 20$		50	50	2	3	10	10	10	10	10	1	1 1/2	2	
	B2	$20 < C \leq 25$		63	60	2	3	10	10	10(16) <sup>4</sup>	16	10(16) <sup>4</sup>	1	1 1/2	2	
Trifásico 380/220V Ver nota 6	C1		$0 < D \leq 20$	40	40	3	4	10	10	10	10	10	1	1 1/2	2	
	C2		$20 < D \leq 30$	50	50	3	4	10	10	10	10	10	1	1 1/2	2	
	C3	$25 < C \leq 50$		63	60	3	4	10	16	10(16) <sup>4</sup>	16	10(16) <sup>4</sup>	1 1/4	2	NÃO	
	C4		$38 < D \leq 45$	70	70	3	4	16	25	16	25	16	1 1/2	2	NÃO	
	C5		$45 < D \leq 55$	80/90 <sup>1,9</sup>	90 <sup>1</sup>	3	4	25	35	25	35	16	1 1/2	2	NÃO	
	C6	$50 < C \leq 75$		100 <sup>1</sup>	100 <sup>1</sup>	3	4	25	35	25	35	16	1 1/2	2	NÃO	
	C7		$65 < D \leq 75$	125 <sup>1</sup>	125 <sup>1</sup>	3	4	35	50	35(50) <sup>4</sup>	50(70) <sup>4</sup>	16(25/35) <sup>4</sup>	2	3	NÃO	

Fonte: Celesc, 2024.

O ramal de entrada da unidade consumidora é através de um circuito trifásico a três condutores, sendo três condutores FASE de seção transversal de 10 mm<sup>2</sup> e um condutor NEUTRO de seção transversal de 10 mm<sup>2</sup> com isolação em HEPR/XLPE 90°C e tensão de atendimento de 380 V.

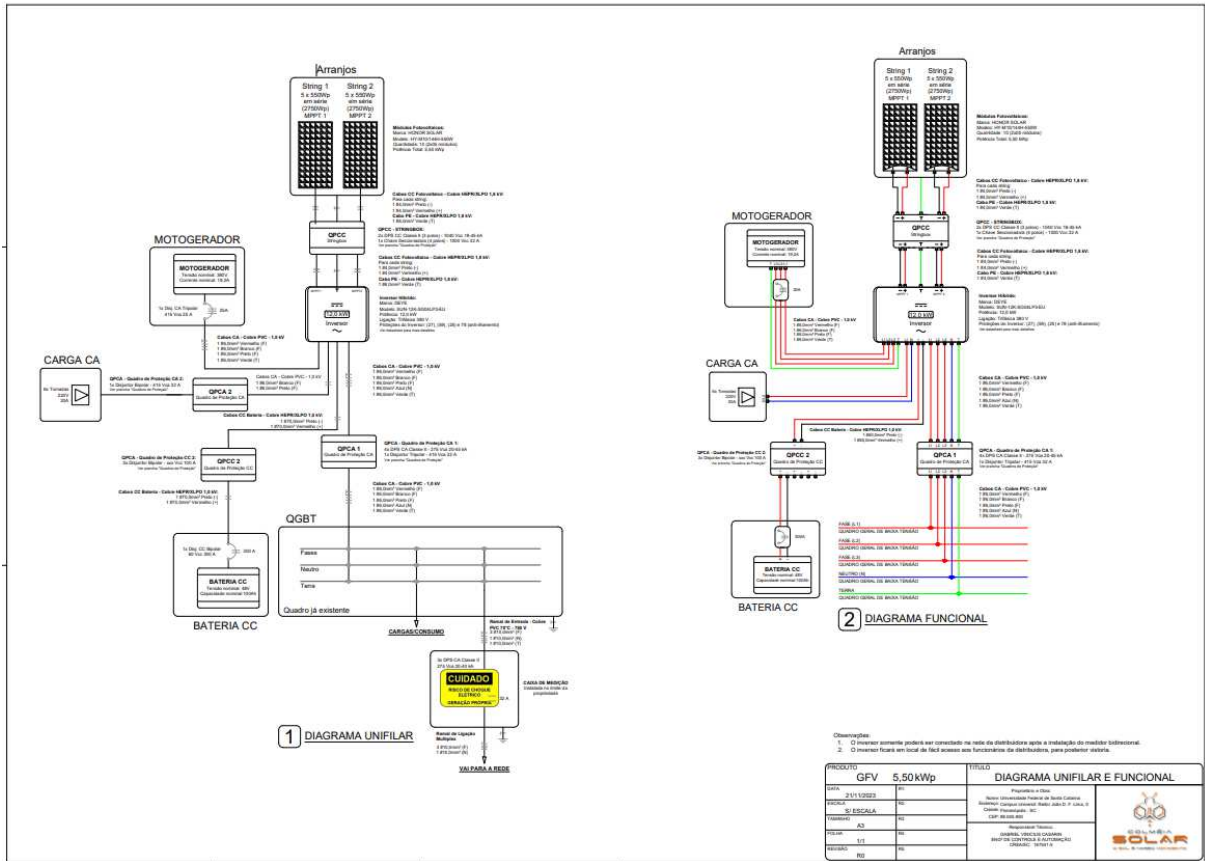
O disjuntor de entrada no ponto de entrega/conexão será instalado um disjuntor termomagnético, em conformidade com as Normas Técnicas da CELESC e Padrões da CELESC Energia, com as seguintes características:

- Número de polos: 2
- Tensão nominal: 220 V
- Corrente nominal: 32 A
- Frequência nominal: 60 HZ

- Elemento de proteção: Termomagnético
- Capacidade máxima de interrupção: 3,0 kA;
- Acionamento: Manual
- Curva de atuação (DISPARO): C.

Logo, apresenta-se o diagrama de blocos na completude do projeto na Figura 79, 80 e 81.

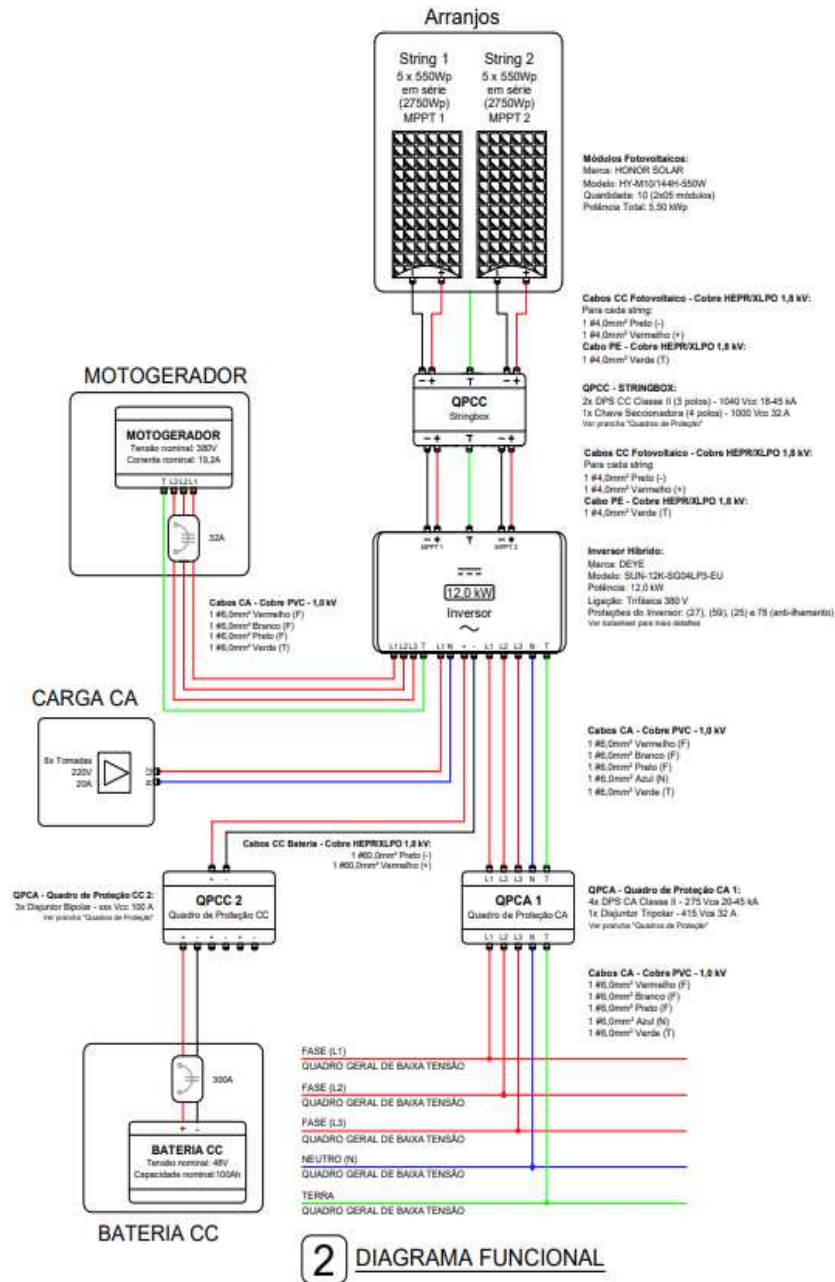
Figura 79 - Diagrama unifilar e multifilar



Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a empresa Colméia Solar, 2024.



Figura 80 - Diagrama Funcional Multifilar



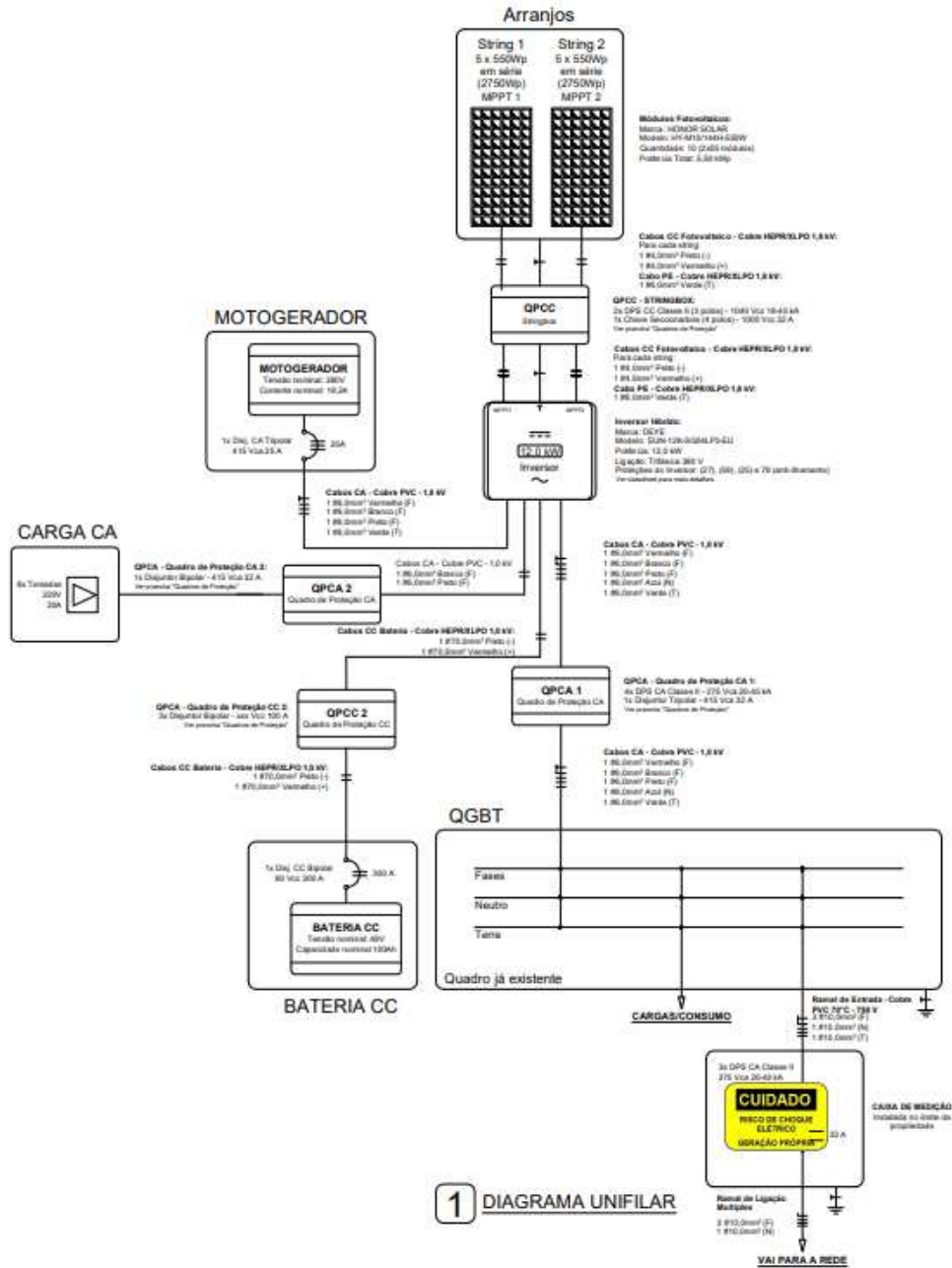
**2** DIAGRAMA FUNCIONAL

PRODUTO <b>GFV 5,50 kWp</b>		TÍTULO <b>DIAGRAMA MULTIFILAR E FUNCIONAL</b>	
DATA 21/11/2023	R1:	Proprietário e Cliente: Nome: Universidade Federal de Santa Catarina Endereço: Campus Universitário, Rector João D. F. Lima, 6 Cidade: Florianópolis - SC CEP: 88.040-900	
ESCALA S/ ESCALA	R2:		
TAMANHO A3	R3:	Responsável Técnico: GABRIEL VINÍCIUS CASARIN ENGR DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO CREA/SC: 187541-5	
FOLHA 1/1	R4:		
REVISÃO R0	R5:		

Fonte: Elaborado pelo autor deste trabalho em parceria com Colméia Solar, 2024.



Figura 81 - Diagrama Unifilar

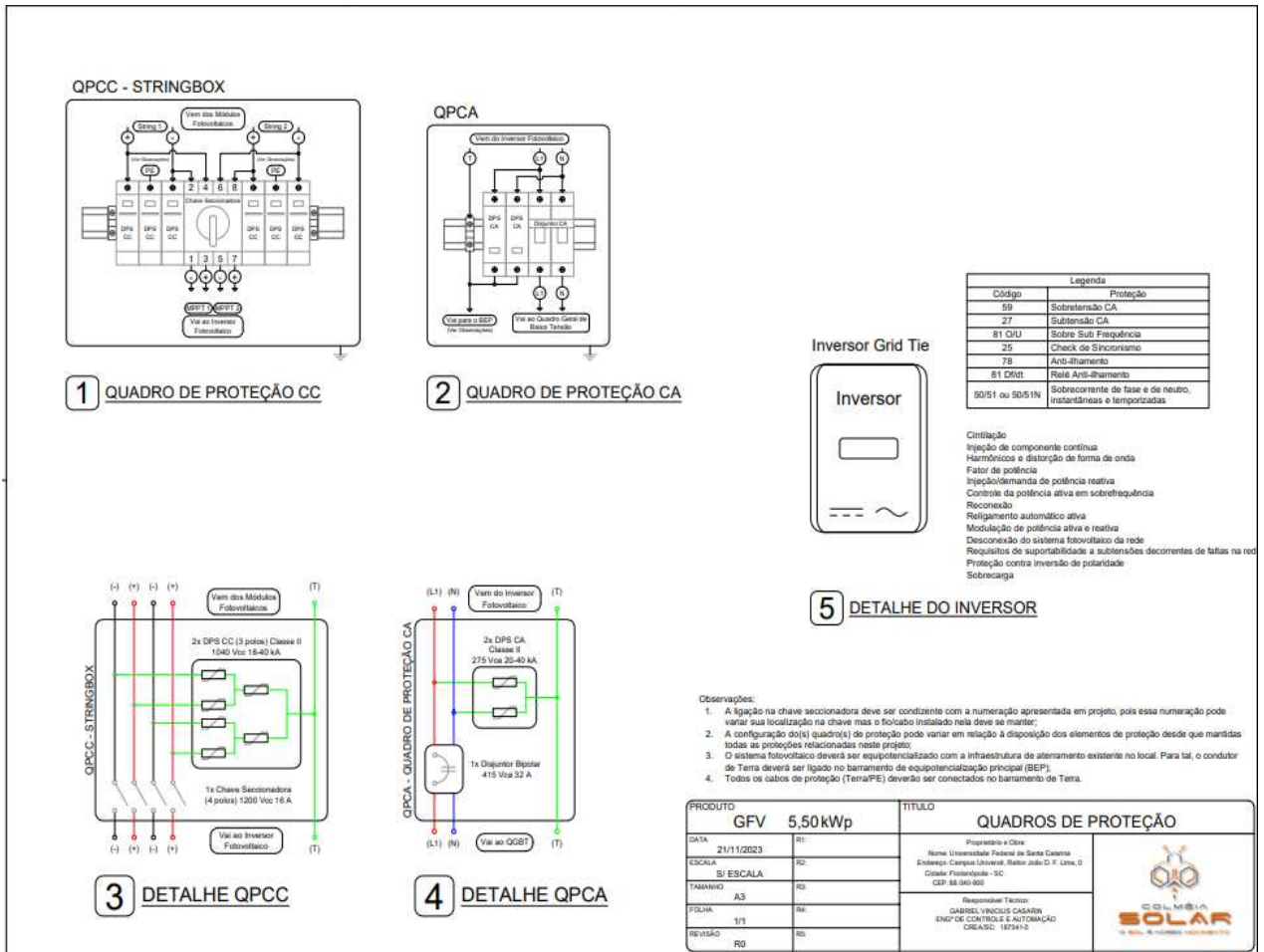


PRODUTO		TÍTULO	
GFV 5,5kWp		DIAGRAMA UNIFILAR E FUNCIONAL	
DATA	R1:	Proprietário e Obra: Nome: Universidade Federal de Santa Catarina Endereço: Campus Universitário, Reitor João D. F. Lima, 9 Cidade: Florianópolis - SC CEP: 88.040-900	
21/11/2023	R2:		
ESCALA	R3:		
S/ ESCALA	R4:		
TAMANHO	R5:		
A3		Responsável Técnico: GABRIEL VINÍCIUS CASARIN ENGR DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO CREA/SC: 187541-5	
FOLHA			
1/1			
REVISÃO			
R0			

Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a empresa Colméia Solar, 2024.

Apresenta-se o quadro de proteção CA e CC do fotovoltaico 82:

Figura 82 - Quadro de proteção CA e CC do fotovoltaico



Fonte: Elaborado pelo autor em parceria com a empresa Colméia Solar, 2024.

## 6 RESULTADOS

O quadro 10 mostra a simulação realizada pela Kaju Energia - responsável pela execução da obra. Foi simulada com um consumo acima da média em relação de carga da UC que é inferior a 1000 kWh. Destaca-se como importante a energia gerada em kWh. Também, ao selecionar o posicionamento das placas e ao desejo de colocá-las ao centro do telhado do imóvel, para maior garantia de sombreamento dos arredores, a resposta dada foi o reforço que não haverá problema com sombreamento e segundo porque o Albedo no local só iniciará uma tensão suficiente para tensão de partida após as 08h da manhã. A alteração para duas strings, para contornar estes possíveis efeitos foi feita pelo autor deste trabalho, deixando registrado aqui a responsabilidade por qualquer consequência desta escolha. Responsabilizar-se por suas escolhas é de fundamental importância deste autor, porém não pelas escolhas dos outros. Hoje, com conhecimento adquirido de engenharia – não a mesma que no início deste projeto a qual meu trabalho concentrava-se na área comercial - eu teria feito outras considerações e imposto alguns limites as escolhas dos que se dizem me ajudar como profissionais da área. Uma delas seria considerar a relação de carga do local e não a colocar hipoteticamente e aleatoriamente como 1000 kWh.

Quadro 10 - Produção energética mensal

<b>MÊS</b>	<b>EXPECTATIVA DE GERAÇÃO (KWH)</b>
Janeiro	755
Fevereiro	702
Março	607
Abril	486
Maio	393
Junho	331
Julho	347
Agosto	325
Setembro	458
Outubro	562
Novembro	713
Dezembro	774

Fonte: Elaborado pelo autor desse trabalho, 2023

A simulação feita pela Kaju Energia deveria garantir uma produção anual total de 6453 kWh/ano e em média mensal a de 538 kWh/mês.

Como visto na Figura 83 devido a um projeto embrionário em desenvolvimento, a coleta de dados só foi concretizada no mês 09 e mês 10. Sendo ela de 300 kWh no mês de setembro e de 425 kWh no mês de outubro.

Quadro 11 - Comparativo Mensal de Expectativa e Geração Real de Energia (kWh)

MÊS	Expectativa de Geração (kWh)	Geração em via de fato (kWh)	Diferença (kWh)
Setembro	458	300	158
Outubro	562	425	137

Fonte: Elaborado pela autor desse trabalho, 2024.

Figura 83 - Modelo se sistema: Energia e Clima



Fonte: Gabriel Monteiro

Comparado estes dois meses, como visto no quadro 11, podemos concluir que a diferença entre a expectativa e a geração em via de fato com uma média de 74 kWh. Reproduzindo isto aos outros meses, como a quadro 12.

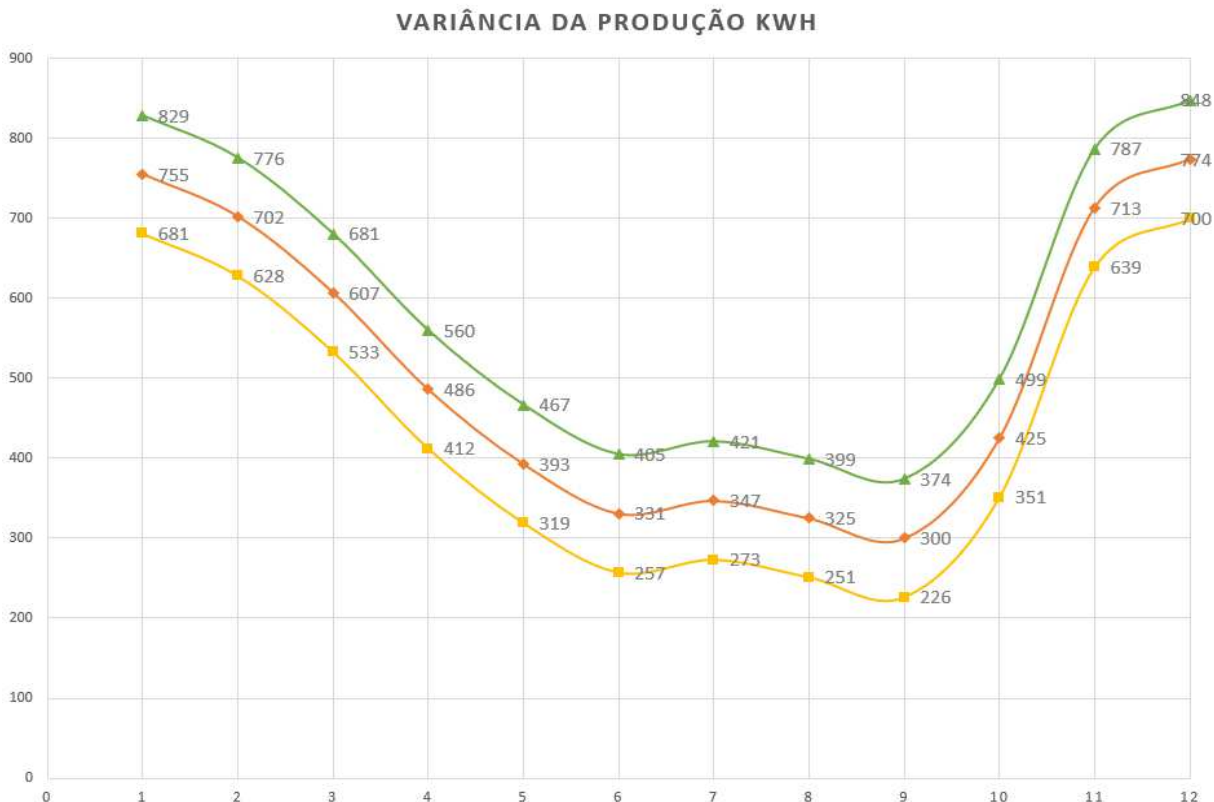
Quadro 12 - Geração de Energia Mensal e Variações (kWh)

Mês	Expectativa de geração (kWh)	Diferença pra menos (kWh)	Diferença pra mais (kWh)
Janeiro	755	681	829
Fevereiro	702	628	776
Março	607	533	681
Abril	486	412	560
Mai	393	319	467
Junho	331	257	405
Julho	347	273	421
Agosto	325	251	399
Setembro	458	226	374
Outubro	562	351	499
Novembro	713	639	787
Dezembro	774	700	848

Elaborado pelo autor desse trabalho, 2024.

Podemos inferir que a expectativa areal de produção energética mensal variará entre as margens apresentadas na Figura 84

Figura 84 - Expectativa areal de produção energética mensal



Fonte: Elabora pelo autor

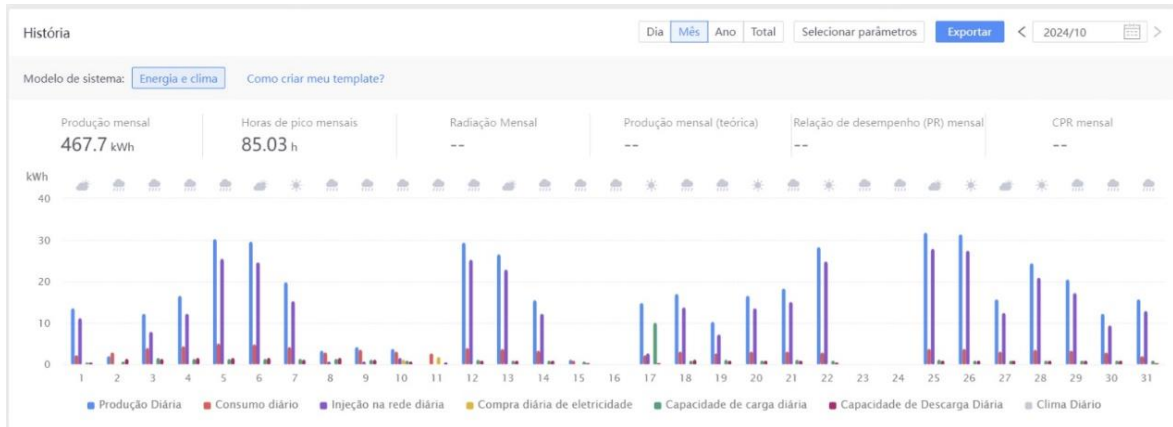
Esta conclusão é ratificada pelas Figura 85 representando o mês de setembro e a Figura 86 representando o mês de outubro corrobora a inferência acima.

Figura 85 - Mês de setembro



Fonte:

Figura 86 - Mês de outubro



Fonte: Gabriel Monteiro

O que na verdade gostaria de se dizer ali, é que todo crédito produzido será utilizado já que a demanda em nossa hipótese é superior. Nela, no cenário hipotético da relação de carga representa 1000 kWh/mês uma fatura anual de R\$ 8640,00 sem energia solar e uma fatura anual de R\$ 3971,19/anual e ratificado pela Figura 88.

Figura 87 - Financeiro - autoconsumo em %

Autoconsumo (%)	Crédito Utilizado (kWh)	Crédito Acumulado (kWh)	Fatura sem Solar	Fatura com Solar
378	378	0	R\$720,00	R\$ 330,93
351	351	0	R\$720,00	R\$ 330,93
303	303	0	R\$720,00	R\$ 330,93
243	243	0	R\$720,00	R\$ 330,93
196	196	0	R\$720,00	R\$ 330,93
166	166	0	R\$720,00	R\$ 330,93
174	174	0	R\$720,00	R\$ 330,93
219	219	0	R\$720,00	R\$ 330,93
229	229	0	R\$720,00	R\$ 330,93
281	281	0	R\$720,00	R\$ 330,93
356	356	0	R\$720,00	R\$ 330,93
387	387	0	R\$720,00	R\$ 330,93
<b>3.282,46</b>	<b>387</b>	<b>0</b>	<b>R\$8.640,00</b>	<b>R\$3.971,19</b>

Fonte: Kaju, 2024.

Figura 88 - Orçamento da Kaju



\*Valores podem sofrer variação devido a ajustes tarifários e impostos



Fonte: Kaju, 2024.

Os resultados obtidos evidenciam a importância em não confiar cegamente nas pessoas e de continuar investindo em pesquisas e desenvolvimentos no campo das uRs, especialmente no contexto de geração distribuída. A implementação de teorias de controle tem um vasto campo com potencial para garantir a estabilidade e a

confiabilidade principalmente contextos em que o desejo de venda prepondera ao de um sistema eficiente, destacando a relevância de um planejamento energético eficiente.



## 7 CONCLUSÃO

O trabalho foi dividido em capítulos que exploram o conceito de uRs, os Recursos Energéticos Distribuídos (RED) e a análise detalhada dos componentes essenciais para a implementação de sistemas de energia solar, incluindo módulos fotovoltaicos, inversores e baterias.

O presente trabalho abordou a implementação de uma uR flexível com fontes renováveis e sistema de armazenamento, adaptada para estudo em laboratório. Através da definição da topologia de rede adequada, dimensionamento e execução da instalação de um sistema de produção de energia com tecnologias de mercado, e pré-configuração do sistema para futuros trabalhos, foi possível alcançar os objetivos propostos.

A uR desenvolvida demonstrou ser uma solução viável e eficiente para a integração de fontes de energia renováveis. Neste caso, como a eólica e a fotovoltaica e baterias como sistemas de armazenamento. A flexibilidade operacional proporcionadas pela hibridização das fontes energéticas permitem uma gestão otimizada tanto da produção quanto da demanda de energia.

Aborda um dos maiores desafios da atualidade: as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas globais. O aumento da temperatura global e a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, resultantes da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, são ameaças reais que podem levar a eventos climáticos extremos e à acidificação dos oceanos.

O estudo destaca a importância da modernização dos sistemas de distribuição de energia, com foco na integração de Recursos de Energia Renovável (RERs), unidades de armazenamento e cargas, além da descentralização da rede. A integração dessas unidades traz desafios significativos para a estabilidade e operação do sistema, como controle, proteção, estabilidade operacional e confiabilidade das redes.

Neste contexto, o Laboratório Multiusuário do Instituto Nacional da Ciência e Tecnologia em Controle e Automação de Processos de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina se propôs a implementação de uma uR conectada à rede com o objetivo de viabilizar a implementação de teorias de controle que gerenciem tanto a produção quanto a demanda de energia.

A pesquisa visa contribuir para a descentralização do fornecimento de energia, otimizando recursos locais e garantindo maior sustentabilidade. Em suma, este estudo contribui para o avanço das tecnologias de uR, oferecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas. A transição para um modelo energético mais sustentável e descentralizado é não apenas uma necessidade, mas uma realidade cada vez mais próxima, impulsionada por inovações como as apresentadas neste trabalho

## REFEFÊNCIAS

ALMUTAIRI, K.; HOSSEINI DEHSHIRI, S. S.; HOSSEINI DEHSHIRI, S. J.; MOSTAFAEIPOUR, A.; ISSAKHOV, A.; TECHATO, K. **Use of a hybrid wind—solar—diesel—battery energy system to power buildings in remote areas: A case study.** *Sustainability*, v. 13, n. 16, p. 8764, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13168764>. Acesso em: 14 out. 2024.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do; BROWER, Michael; ZACK, John; SA, Antonio Leite de. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Camargo Schubert Engenharia Eólica; True Wind Solutions; Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2001.

AMIRKHALILI, S. A.; ZAHEDI, A. R. **Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid wind/fuel cell microgrid system: A case study in Kouhin region in Qazvin.** *International Journal of Energy Research*, 2018. doi: 10.1002/fuce.201700149. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fuce.201700149>. Acesso em: 14 out. 2024.

ANDRZEJEWSKI, Maciej; PIELECHA, Ireneusz; MERKISZ, Jerzy; ŚWIECHOWICZ, Robert; NOWAK, Mateusz. **Modern drive systems of rail vehicles.** *Combustion Engines*, v. 178, p. 76-81, 2019.

BAE, S.; KWASINSKI, A. **Dynamic modeling and operation strategy for a microgrid with wind and photovoltaic resources.** *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 4, p. 1867-1876, dez. 2012. doi: 10.1109/TSG.2012.2198498.

BARBARO, Marco; CASTRO, Rui. **Design optimisation for a hybrid renewable microgrid: Application to the case of Faial island, Azores archipelago.** *Renewable Energy*, v. 151, p. 434-445, 2020. ISSN 0960-1481. doi: 10.1016/j.renene.2019.11.034. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811931715X>. Acesso em: 14 out. 2024.

BASTIDAS RODRIGUEZ, J. D.; RAMOS PAJA, C. A. Tipos de inversores y topologías para aplicaciones de microrredes. *Revista UIS Ingenierías*, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 7–14, 2016. Disponível em: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/5637>. Acesso em: 18 oct. 2024.

BASTIDAS RODRIGUEZ, J. D.; RAMOS PAJA, C. A. **Tipos de inversores y topologías para aplicaciones de microrredes.** *Revista UIS Ingenierías*, v. 16, n. 1, p. 7-14, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n1-2017001>. Acesso em: 16 out. 2024.

BESSO, Rachel. **Sistema solar fotovoltaico conectado à rede – estudo de caso no Centro de Tecnologia da UFRJ. Projeto de Graduação (Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.**

BISWAL, Mousumi; SABYASACHI, Sidharth. **A study on recent DC-DC converters**. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), v. 2, n. 6, p. 657-663, nov./dez. 2012. Disponível em: <[www.ijera.com](http://www.ijera.com)>. Acesso em: 18 out. 2024.

BRAGA, José Poluceno Pires Vieira; LISBOA, Alexandre Heringer. **Usina térmica solar para médias e altas temperaturas utilizando concentradores cilíndrico-parabólicos - análise de componentes**. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, Belém: [s.n.], 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. **Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil**. 2017. Disponível em: <https://www.abaque.com.br>. Acesso em: 18 out. 2024.

CAMPOS, Felipe Melo; ARAÚJO, Danielly Norberto; TOLEDO, Olga Moraes; FERNANDES, Lucas do Espírito Santo; BORBA, Ana Tereza Andrade. **Tecnologias e aplicações de sistemas de armazenamento de energia para suporte à integração de fontes renováveis no Brasil**. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2022, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: SENAI CIMATEC, 2022.

CAMPOS, Felipe Melo; ARAÚJO, Danielly Norberto; TOLEDO, Olga Moraes; FERNANDES, Lucas do Espírito Santo; BORBA, Ana Tereza Andrade. **Tecnologias e aplicações de sistemas de armazenamento de energia para suporte à integração de fontes renováveis no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, Florianópolis: Associação Brasileira de Energia Solar, 2022.

CARVALHO, Bismarck Castillo. **Desenvolvimento de modelo computacional de sistemas eólicos utilizando geradores síncronos para estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

CASARIN, Gabriel Vinicius. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica baseado em um estudo de caso**. 2019. Relatório de estágio (Projeto de Fim de Curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

ÇELIK, Özgür; TEKE, Ahmet; TAN, Adnan. Overview of micro-inverters as a challenging technology in photovoltaic applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews\*, v. 82, p. 3191-3206, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.024>. Acesso em: 18 out. 2024.

DAWOOD, F.; SHAFIULLAH, G.; ANDA, M. **Stand-alone microgrid with 100% renewable energy: a case study with hybrid solar PV-battery-hydrogen**.

Sustainability, v. 12, n. 5, p. 2047, 2020. doi: 10.3390/su12052047. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12052047>. Acesso em: 14 out. 2024.

FOSSAS, E.; OLIVAR, G. **Study of chaos in the buck converter**. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, v. 43, n. 1, p. 13-25, jan. 1996.

GOUVÊA, Adriana Ribeiro. **Uma visão estratégica do setor de distribuição de energia elétrica frente aos desafios da expansão de recursos energéticos distribuídos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

GRAOSQUE, Alexandre de Assis Brasil; DIAS, João Batista. **Sistema fotovoltaico conectado à rede com microinversores usando estocagem**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.

HALL, Peter J.; BAIN, Euan J. **Energy-storage technologies and electricity generation**. Energy Policy, v. 36, n. 12, p. 4352-4355, dez. 2008.

HOSSAIN, M.Z.; RAHIM, N.A.; SELVARAJ, Jeyraj a/l. **Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, parte 1, p. 205-230, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.017>. Acesso em: 16 out. 2024.

KHARRICH, M.; KAMEL, S.; ALGHAMDI, A. S.; EID, A.; MOSAAD, M. I.; AKHERRAZ, M.; ABDEL-AKHER, M. **Optimal design of an isolated hybrid microgrid for enhanced deployment of renewable energy sources in Saudi Arabia**. Sustainability, v. 13, n. 9, p. 4708, 2021. doi: 10.3390/su13094708. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13094708>. Acesso em: 14 out. 2024.

KHARRICH, M.; MOHAMMED, O. H.; KAMEL, S.; SELIM, A.; SULTAN, H. M.; AKHERRAZ, M.; JURADO, F. **Development and implementation of a novel optimization algorithm for reliable and economic grid-independent hybrid power system**. Applied Sciences, v. 10, n. 18, p. 6604, 2020. doi: 10.3390/app10186604. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10186604>. Acesso em: 14 out. 2024.

LIDULA, N. W. A.; RAJAPAKSE, A. D. Microgrids research: **A review of experimental microgrids and test systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 1, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211000328X>. Acesso em: 14 out. 2024.

MA, Tao; YANG, Hongxing; LU, Lin; PENG, Jinqing. **Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong**. Renewable Energy, v. 69, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114001736>. Acesso em: 14 out. 2024.

MARINOSKI, Deivis Luis; SALAMONI, Isabel Tourinho; RÜTHER, Ricardo. **Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC.** In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, São Paulo, 2004.

MAKHDOOMI, Sina; ASKARZADEH, Alireza. **Optimizing operation of a photovoltaic/diesel generator hybrid energy system with pumped hydro storage by a modified crow search algorithm.** Journal of Energy Storage, v. 27, p. 101040, 2020. ISSN 2352-152X. doi: 10.1016/j.est.2019.101040. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19306759>. Acesso em: 14 out. 2024.

MARIAM, Lubna; BASU, Malabika; CONLON, Michael F. **A review of existing microgrid architectures.** International Journal of Renewable Energy Research, v. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2013/937614>. Acesso em: 14 out. 2024.

MASAUD, T. M.; LEE, K.; SEN, P. K. **An overview of energy storage technologies in electric power systems: What is the future?** In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM, 2010.

MEOÑEZ, Orlando José Ordoñez. **Evaluación del recurso eólico: análisis de las características de Vortex Bladeless en Puerto Cortés, Honduras.** Projeto de pesquisa (Engenheiro em Energia) – Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana, Campus San Pedro Sula, 2020.

MOHAMMADI, Kasra; KHANMOHAMMADI, Saber; KHORASANIZADEH, Hossein; POWELL, Kody. **A comprehensive review of solar only and hybrid solar driven multigeneration systems: Classifications, benefits, design and prospective.** Applied Energy, v. 268, p. 114940, 2020. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114940>. Acesso em: 16 out. 2024.

MÜLLER, Matheus do Nascimento. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal.** 2015. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA, Fernando Pestana. **Produção de Energia Elétrica a partir de Biomassa Gerada pela Indústria de Celulose.** Instituição Pitágoras, Teixeira de Freitas, 2022.

OMIDO, Agleison Ramos; BARBOZA, Christian Souza; MOREIRA JÚNIOR, Orlando. **Energia geotérmica: uma aliada na busca da eficiência energética.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, VIII, 2017, Campo Grande, MS. Anais [...]. Campo Grande: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2017. Acesso em: 16 out. 2024.

ORDOÑEZ MEOÑEZ, Orlando José. **Avaliação do recurso eólico: análise das características de Vortex Bladeless em Puerto Cortés, Honduras.** 2020. Projeto de Pesquisa (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Tecnológica Centroamericana, Faculdade de Engenharia, San Pedro Sula, 2020.

OULIS ROUSIS, A.; TZELEPIS, D.; KONSTANTELOS, I.; BOOTH, C.; STRBAC, G. **Design of a hybrid AC/DC microgrid using HOMER Pro: case study on an islanded residential application.** *Inventions*, v. 3, n. 3, p. 55, 2018. doi: 10.3390/inventions3030055. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/inventions3030055>. Acesso em: 14 out. 2024.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: INPE, 2. ed. 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 14 out. 2024.

REDAÇÃO. **Energia eólica offshore: como a geração no mar chegará ao Sistema Interligado Nacional.** Além da Energia - ENGIE, 09 out. 2023. Disponível em: <https://www.alem-da-energia.engie.com.br/energia-eolica-offshore-beneficia-brasileiros/>. Acesso em: 16 out. 2024.

REIS, Pedro. **Fontes de energia – Tudo sobre energias renováveis.** Portal Energia, 2024. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>. Acesso em: 16 out. 2024.

REZK, H.; KANAGARAJ, N.; AL-DHAIFALLAH, M. **Design and sensitivity analysis of hybrid photovoltaic-fuel-cell-battery system to supply a small community at Saudi NEOM City.** *Sustainability*, v. 12, n. 8, p. 3341, 2020. doi: 10.3390/su12083341. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12083341>. Acesso em: 14 out. 2024.

SAEED, M. H.; FANGZONG, W.; KALWAR, B. A.; IQBAL, S. **A review on microgrids' challenges & perspectives.** *IEEE Access*, v. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135083>. Acesso em: 14 out. 2024.

SCROSATI, Bruno; GARCHE, Jürgen. **Lithium batteries: Status, prospects and future.** *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 9, p. 2419-2430, 2010.

SILVA, Celso Roberto Alves da; GARRAFA, Maria Teresa Flosi; NAVARENHO, Paulo Laguna; GADO, Rodolfo; YOSHIMA, Sérgio. A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 2, 2015.

SIMÕES, Daniela. **O maior parque eólico offshore do mundo será inaugurado no Mar da Irlanda: o Walney Extension terá capacidade de 659 megawatts, o suficiente para abastecer 600 mil casas.** 2018. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Mundo/noticia/2018/09/o-maior-parque-eolico-offshore-do-mundo-sera-inaugurado-no-mar-da-irlanda.html>. Acesso em: 18 out. 2024.

SOTÃO, André; MORAES, Carlos; CORRÊA, Derick; FERREIRA, Douglas; AUGUSTO, Marcos; QUARESMA, Sávio; REIS, Vinicius. **Projeto de energia eólica.** Disponível em: <https://www.revistaea.org/pf.php?idartigo=2639>. Acesso em: 18 out. 2024.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

VILELA, Afrânio Ornelas Ruas. **Projeto e Construção de um Conversor Boost Controlado em Modo de Tensão**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

WANG, P.; LIU, X.; JIN, C.; LOH, P.; CHOO, F. **A hybrid AC/DC micro-grid architecture, operation and control**. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2011, Detroit, MI, USA. Anais [...]. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1-8. doi: 10.1109/PES.2011.6039453.

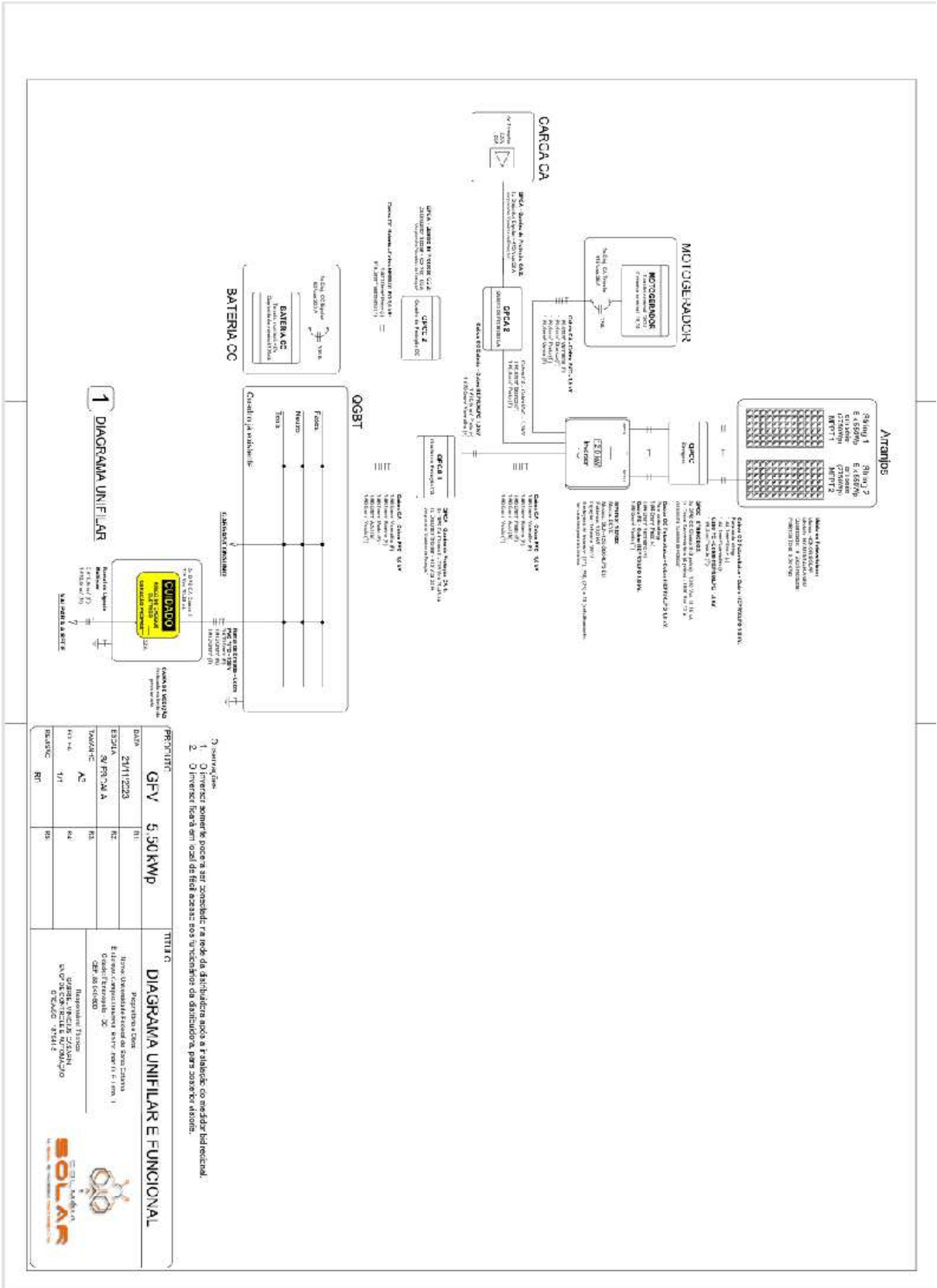
WANG, X. *et al.* Day-ahead optimal economic dispatching of integrated port energy systems considering hydrogen. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 58, n. 2, p. 2619–2629, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tia.2021.3095830>. Acesso em: 14 out. 2024.

Diagramas e pranchas referentes ao projeto da microrede:  
[https://drive.google.com/drive/folders/1cHQCnQCjwCZXOXnjTzc3sVTcFfT117Cn?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1cHQCnQCjwCZXOXnjTzc3sVTcFfT117Cn?usp=drive_link)



ANEXOS

DIAGRAMA UNIFILAR



## QUADROS DE PROTEÇÃO CA E CC

### 1 QUADRO DE PROTEÇÃO CC

### 2 QUADRO DE PROTEÇÃO CA

### 3 DETALHE QPCC

### 4 DETALHE QPCA

### 5 DETALHE DO INVERSOR

**Inversor**

**Inversor Grid Tie**

Código	Legenda	Proteção
59	Subtenso CA	
27	Subtenso CA	
81 OIU	Subos Sub-Frequência	
25	Check de Sincronismo	
78	Anti-ilhamento	
81 DIdT	Relé Anti-ilhamento	
50/51 ou 50/51N	Subcorrente de fase e de neutro, instantâneas e temporizadas	

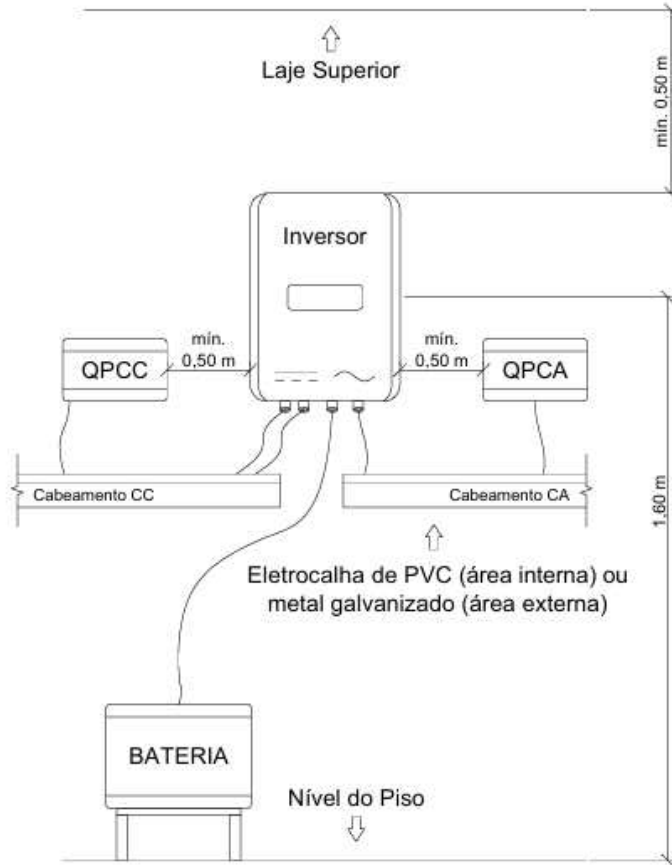
**Chamado**  
Injeção de componente contínua  
Injeção de componente reativo  
Fator de potência  
Injeção de potência reativa  
Injeção de potência ativa em subfrequência  
Reconhecimento  
Reajuste automático ativo  
Modulação de potência ativa e reativa  
Desconexão do sistema fotovoltaico da rede  
Injeção de potência ativa e reativa para suporte à rede  
Proteção anti-inversão de polaridade  
Sobrecarga

**Observações:**

- A ligação na chave seccionadora deve ser condizente com a numeração apresentada em projeto, pois essa numeração pode variar sua localização na chave mas o local do instalado real deve ser manter;
- Antes da instalação (ou durante) de proteção deve ser feita a verificação da disposição dos elementos de proteção desde que mantidas todas as condições de segurança de trabalho;
- O sistema fotovoltaico deverá ser equipotencializado com a infraestrutura de aterramento existente no local. Para tal, o condutor de Terra deverá ser ligado no barramento de equipotencialização principal (BEP);
- Todos os cabos de proteção (Terra/PE) deverão ser conectados no barramento de Terra.

PRODUTO	TÍTULO
GFV 5,50 kWp	QUADROS DE PROTEÇÃO
DATA: 21/11/2023	Projeto e Dire
ESCALA: 1/1	Nome: Universidade Federal de São Carlos
TAMANHO: A3	Endereço: Av. João Carlos de Almeida, 1000 - São Carlos, SC
FOGLIA: 1/1	CEP: 88204-900
REVISÃO: R0	Responsável Técnico: GABRIEL VINÍCIUS CASARIN - ENG.º ELETRICISTA - 187541/5

**INSTALAÇÃO DO SISTEMA**



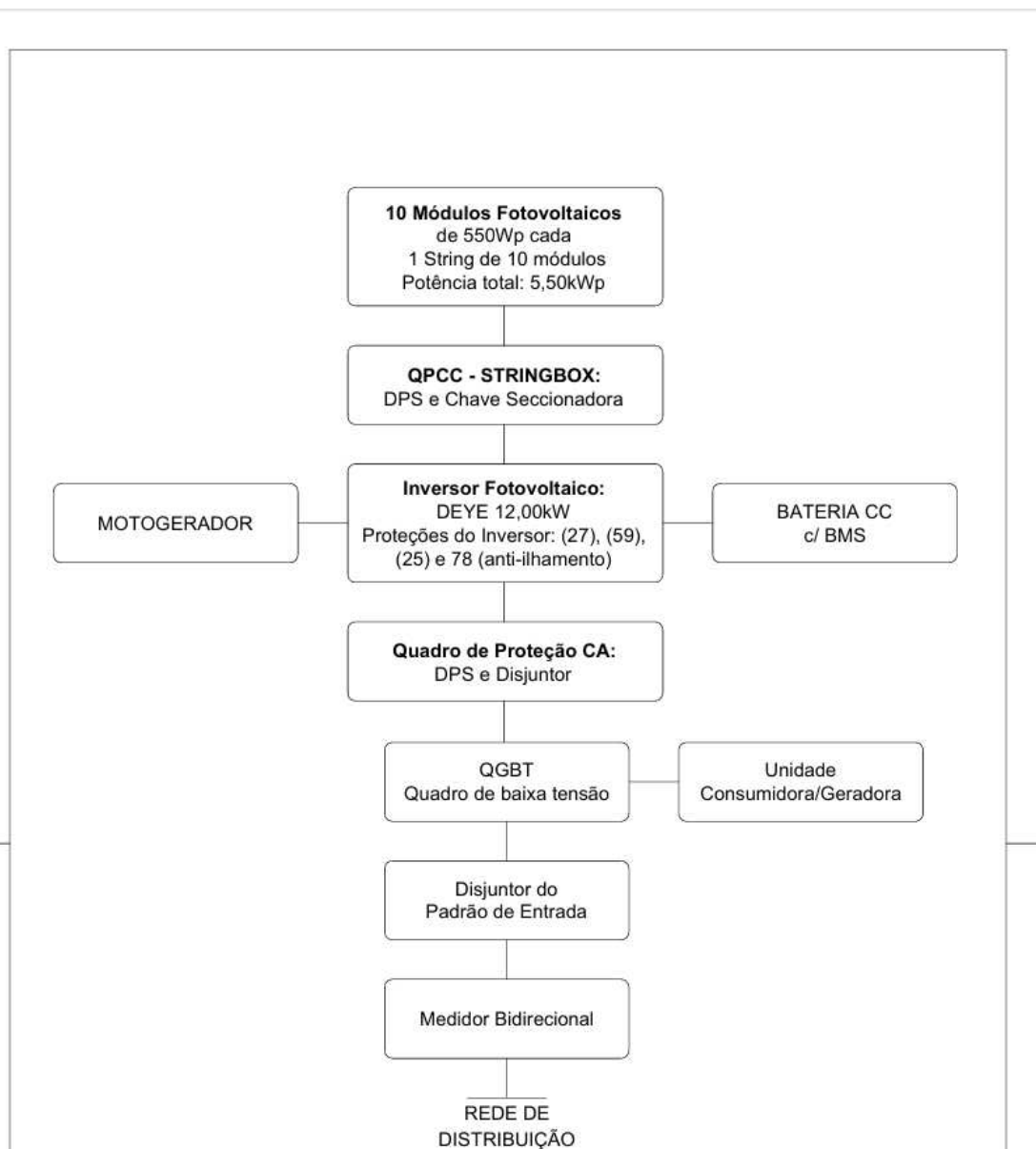
**1 BAY FACE DO INVERSOR**

**Observações:**

1. Deve ser observada a localização da entrada e saída de ar do inversor e não obstruí-las ou instalar o equipamento com essas faces muito próximo à parede e/ou quadros de proteção;
2. O(s) quadro(s) de proteção pode(m) ser instalado(s) em outra configuração, desde que mantenham os espaçamentos mínimos em relação ao(s) inversor(es);
3. O inversor somente poderá ser conectado na rede da distribuidora após a instalação do medidor bidirecional;
4. O inversor ficará em local de fácil acesso aos funcionários da distribuidora, para posterior vistoria.

<b>PRODUTO</b> <b>GFV 5,50 kWp</b>		<b>TÍTULO</b> <b>INSTALAÇÃO DO SISTEMA</b>	
DATA 21/11/2023	R1:	Proprietário e Obra: Nome: Universidade Federal de Santa Catarina Endereço: Campus Universitário, Reitor João D. F. Lima, 0 Cidade: Florianópolis - SC CEP: 88.040-900  Responsável Técnico: GABRIEL VINÍCIUS CASARIN ENGº DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO CREA/SC: 187541-5	
ESCALA S/ ESCALA	R2:		
TAMANHO A4	R3:		
FOLHA 1/1	R4:		
REVISÃO R0	R5:		

## DIAGRAMA DE BLOCOS



# 1 DIAGRAMA DE BLOCOS

PRODUTO		TÍTULO	
GFV 5,50 kWp		DIAGRAMA DE BLOCOS	
DATA	R1:	Proprietário e Obra:	
21/11/2023		Nome: Universidade Federal de Santa Catarina	
ESCALA	R2:	Endereço: Campus Universit. Reitor João D. F. Lima, 0	
S/ ESCALA		Cidade: Florianópolis - SC	
TAMANHO	R3:	CEP: 88.040-900	
A4		Responsável Técnico:	
FOLHA	R4:	GABRIEL VINICIUS CASARIN	
1/1		ENGº DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO	
REVISÃO	R5:	CREA/SC: 187541-5	
R0			

**PLANTA DE SITUAÇÃO**



**1 PLANTA DE SITUAÇÃO E LOCALIZAÇÃO**

Observações:

1. Os módulos serão instalados sobre a cobertura da edificação.
2. O inversor será instalado dentro da edificação.

<b>PRODUTO</b> GFV 5,50 kWp		<b>TÍTULO</b> PLANTA DE SITUAÇÃO	
DATA 21/11/2023	R1:	Proprietário e Obra: Nome: Universidade Federal de Santa Catarina Endereço: Campus Universit. Reitor João D. F. Lima, 0 Cidade: Florianópolis - SC CEP: 88.040-900	
ESCALA S/ ESCALA	R2:		
TAMANHO A4	R3:	Responsável Técnico: GABRIEL VINÍCIUS CASARIN ENGº DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO CREA/SC: 187541-5	
FOLHA 1/1	R4:		
REVISÃO R0	R5:		



DATASHEET MÓDULO

# HY-M10/144 HY-M10/144H

## Monocrystalline Module

530-555W

### Electrical Specification (STC\*)

Maximum Power	P <sub>max</sub> [W]	530	535	540	545	550	555
Maximum Power Voltage	V <sub>mp</sub> [V]	40.74	40.88	41.01	41.15	41.28	41.41
Maximum Power Current	I <sub>mp</sub> [A]	13.01	13.09	13.17	13.24	13.32	13.39
Open Circuit Voltage	V <sub>oc</sub> [V]	49.26	49.40	49.53	49.67	49.80	49.93
Short Circuit Current	I <sub>sc</sub> [A]	13.69	13.77	13.85	13.93	14.01	14.09
Module Efficiency	[%]	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5
Power Output Tolerance	[W]			0+5			

\* Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Module Temperature 25°C, Air Mass 1.5

### Electrical Specification (NOCT\*)

Maximum Power	P <sub>max</sub> [W]	394	398	402	406	410	414
Maximum Power Voltage	V <sub>mp</sub> [V]	37.92	38.05	38.19	38.32	38.46	38.59
Maximum Power Current	I <sub>mp</sub> [A]	10.40	10.46	10.52	10.58	10.64	10.72
Open Circuit Voltage	V <sub>oc</sub> [V]	46.50	46.63	46.75	46.88	47.00	47.12
Short Circuit Current	I <sub>sc</sub> [A]	11.06	11.12	11.19	11.25	11.32	11.39

\* Irradiance 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s

### Mechanical Data

Number of Cells	144 Cells [6×24]
Dimensions of Module L*W*H (mm)	2278×1134×30mm [89.68×44.64×1.18 inches]
Weight [kg]	26.9 kg
Glass	High transparency solar glass 3.2mm (0.13 inches)
Backsheet	White
Frame	Silver, anodized aluminium alloy
J-Box	IP68 Rated
Cable	4.0mm <sup>2</sup> [0.006 inches <sup>2</sup> ], 1200mm [47.2 inches]
Number of diodes	3
Wind/ Snow Load	2400Pa/ 5400Pa*
Connector	MC Compatible

\* For more details please check the installation manual

### Temperature Ratings

Nominal Operating Cell Temperature [NOCT]	44±2°C
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub>	+0.048%/°C
Temperature Coefficient of V <sub>oc</sub>	-0.270%/°C
Temperature Coefficient of P <sub>max</sub>	-0.350%/°C

### Maximum Ratings

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1500V DC [-H]
Max Series Fuse Rating	25A

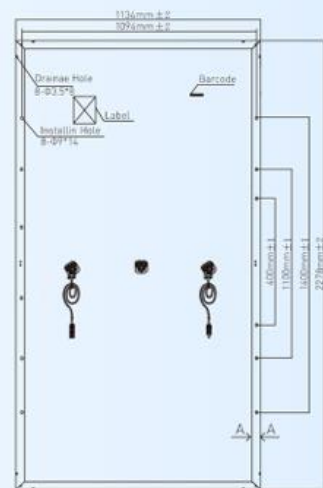
### Packaging Configuration

Module per box	36 pieces
Module per 40' container	720 pieces

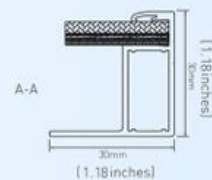
### Optional

Connector	<input checked="" type="checkbox"/> MC Original
-----------	---

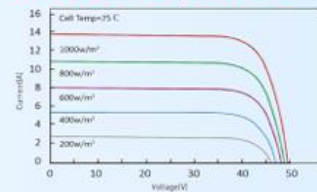
### Module Dimension



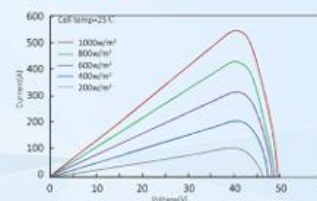
Back View



### I-V Curve at Different Temperature (530W)



### I-V-P Curve at Different Irradiation (530W)



## DATASHEET INVERSOR DEYE

## Technical Data

www.deyeinverter.com

Model	SUN-5K -SG04LP3-EU	SUN-6K -SG04LP3-EU	SUN-8K -SG04LP3-EU	SUN-10K -SG04LP3-EU	SUN-12K -SG04LP3-EU
<b>Battery Input Data</b>					
Battery Type	Lead-acid or Li-Ion				
Battery Voltage Range (V)	40~60				
Max. Charging Current (A)	120	150	190	210	240
Max. Discharging Current (A)	120	150	190	210	240
External Temperature Sensor	Yes				
Charging Curve	3 Stages / Equalization				
Charging Strategy for Li-Ion Battery	Self-adaption to BMS				
<b>PV String Input Data</b>					
Max. DC Input Power (W)	6500	7800	10400	13000	15600
Rated PV Input Voltage (V)	550 (160~800)				
Start-up Voltage (V)	160				
MPPT Voltage Range (V)	200-650				
Full Load DC Voltage Range (V)	350-650				
PV Input Current (A)	13+13				26+13
Max. PV ISC (A)	17+17				34+17
Number of MPPT / Strings per MPPT	2/1+1				2/2+1
<b>AC Output Data</b>					
Rated AC Output and UPS Power (W)	5000	6000	8000	10000	12000
Max. AC Output Power (W)	5500	6600	8800	11000	13200
AC Output Rated Current (A)	7.6	9.1	12.1	15.2	18.2
Max. AC Current (A)	11.4	13.6	18.2	22.7	27.3
Max. Continuous AC Passthrough (A)	45				
Peak Power (off grid)	2 time of rated power, 10 S				
Power Factor	0.8 leading to 0.8 lagging				
Output Frequency and Voltage	50/60Hz; 3L/N/PE 220/380, 230/400Vac				
Grid Type	Three Phase				
DC injection current (mA)	THD<3% (Linear load<1.5%)				
<b>Efficiency</b>					
Max. Efficiency	97.60%				
Euro Efficiency	97.00%				
MPPT Efficiency	99.90%				
Integrated PV Input Lightning Protection, Anti-islanding Protection, PV String Input Reverse Polarity Protection, Insulation Resistor Detection, Residual Current Monitoring Unit, Output Over Current Protection, Output Shorted Protection, Surge protection					
Output Over Voltage Protection	DC Type II/AC Type III				
<b>Certifications and Standards</b>					
Grid Regulation	CEI 0-21, VDE-AR-N 4105, NRS 097, IEC 62116, IEC 61727, G99, G98, VDE 0126-1-1, RD 1699, C10-11				
Safety EMC / Standard	IEC/EN 61000-6-1/2/3/4, IEC/EN 62109-1, IEC/EN 62109-2				
<b>General Data</b>					
Operating Temperature Range (°C)	-45~60°C, >45°C derating				
Cooling	Smart cooling				
Noise (dB)	<45 dB				
Communication with BMS	RS485; CAN				
Weight (kg)	33.6				
Size (mm)	422W x 699.3H x 279D				
Protection Degree	IP65				
Installation Style	Wall-mounted				
Warranty	5 years				

Ningbo Deye Inverter Technology Co., Ltd

Add: No.26-30, South Yongjiang Road, Beilun, 315806, Ningbo, China | Tel: 0086-0574-86120560 | E-mail: market@deye.com.cn