

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**LEONARDO LOURENÇO GOMES
VINICIUS HIDEO KUADA**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO COM ANTI-
ILHAMENTO**

**CURITIBA
2022**

**LEONARDO LOURENÇO GOMES
VINICIUS HIDEO KUADA**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO COM ANTI-
ILHAMENTO**

Implementation of a hybrid photovoltaic system with anti-islanding

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Rubens Alexandre de Faria.

Coorientador(a): Diego Fernandes.

**CURITIBA
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LEONARDO LOURENÇO GOMES
VINICIUS HIDEO KUADA**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO COM ANTI-
ILHAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada
como requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13/dezembro/2022

Rubens Alexandre de Faria
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Fernando Copetti
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ubirajara Zoccoli
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2022**

Dedicamos este trabalho às nossas famílias,
pelo apoio incondicional durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Diego Fernandes, que se reuniu conosco incessantemente a fim de nos guiar para a realização deste trabalho.

Aos nossos familiares e amigos, que nos deram suporte emocional durante todos os anos de graduação, pois sem eles poderíamos ter sucumbido durante qualquer etapa desse processo de formação acadêmica.

Aos nossos professores, que nos calejaram para nos tornarmos cada vez mais fortes e resilientes.

Por fim, agradecemos à instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná que nos proporcionou não apenas um curso de ensino superior, mas também um lar onde conhecemos amigos e professores que serão lembrados pelo resto da nossa jornada.

“O insucesso é apenas uma oportunidade
para recomeçar com mais inteligência.”

Henry Ford

RESUMO

O uso de sistemas fotovoltaicos vem crescendo exponencialmente nos últimos anos, devido a ser um sistema mais acessível, amplamente difundido e com um retorno financeiro em média de 5 anos. Com as normas vigentes é possível injetar na rede o excedente de energia elétrica produzida pelos painéis, trazendo assim o benefício de créditos que podem ser revertidos em descontos nas futuras faturas. Porém, quando o abastecimento de energia da rede é interrompido, o sistema barra o funcionamento da unidade com geração solar para prevenir possíveis acidentes que poderiam ocorrer ao ter a rede elétrica externa energizada. Logo, ao ocorrer uma queda de energia da rede, toda energia que o sistema fotovoltaico geraria é desperdiçada, pois não há como armazenar ou mesmo utilizar instantaneamente no local de instalação. Portanto, o objetivo desse estudo é desenvolver um sistema fotovoltaico que tenha um banco de baterias e um sistema de anti-ilhamento, o qual, ao detectar uma falha no fornecimento de energia da rede, o sistema fotovoltaico possa continuar alimentando a unidade consumidora através da energia armazenada pelo banco de baterias e sem contato com a rede externa.

Palavras-chave: sistema fotovoltaico; sistema híbrido; banco de baterias; anti-ilhamento.

ABSTRACT

The usage of photovoltaic systems has been growing exponentially in the last years, due became a more accessible system, highly spread and it takes an average of five years to be self-paid. Due to the current standards, it is possible to insert the excess of electrical energy produced by the panels in the electrical net, bringing credits as a benefit, and they may become discounts in the electric energy bill. But, when a blackout occurs, the system stops the operation of the consumer unit of working with photovoltaic energy, in order to prevent eventual accidents caused by having the electrical network energized. So, when a blackout occurs all the energy produced by the photovoltaic system would be wasted, because it cannot be stored and neither be consumed. Therefore, the goal of this study is developing a photovoltaic system that has a battery bank and an anti-islanding system, this system must detect a failure in the electric net and still be able to feed the consumer unit with the energy stored in the battery bank, with no contact with the electric net.

Keywords: photovoltaic system; hybrid system; battery bank; anti-islanding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Transformador de alta potência.....	20
Figura 2 - Associação de baterias em paralelo	21
Figura 3 - Ciclo de vida da bateria estacionária	21
Figura 4 - Representação dos meios de radiação solar	23
Figura 5 - Eficiência dos diferentes tipos de painel solar	24
Figura 6 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	25
Figura 7 - Funcionamento painel On-Grid	26
Figura 8 - Funcionamento painel Off-Grid.....	27
Figura 9 - Total diário da irradiação global horizontal no Brasil	28
Figura 10 - Total diário da irradiação direta normal no Brasil	29
Figura 11 - Total Anual de Irradiação Global Horizontal no Paraná	30
Figura 12 - Total Anual de Irradiação Direta Normal no Paraná	31
Figura 13 - Total Anual de Irradiação Difusa no Paraná.....	31
Figura 14 - Arduino Uno	32
Figura 15 - Exemplo de Ponte H.....	33
Figura 16 - Fluxograma de funcionamento do circuito	34
Figura 17 - Diagrama de instalação dos componentes do sistema.....	35
Figura 18 - Esquemático do inversor	37
Figura 19 - Simulação do inversor	38
Figura 20 - Protótipo do circuito do inversor	38
Figura 21 - Saída do inversor	39
Figura 22 - Regiões de trabalho dos transistores	40
Figura 23 - Ponte H transistorizada (Inversor)	41
Figura 24 - Ponte H transistorizada (Rede Elétrica)	41
Figura 25 - Solução completa	42
Figura 26 - Lâmpada de 12V (Carga)	43
Figura 27 - Circuito completo montado	44
Figura 28 - Circuito completo montado com relés e microcontrolador	44
Figura 29 - Formato de onda no inversor (sem carga)	45
Figura 30 - Formato de onda na rede elétrica (sem carga).....	46
Figura 31 - Formato de onda no inversor (com carga).....	47

Figura 32 - Formato de onda do inversor em queda da rede (com carga).....	48
Figura 33 - Formato de onda na rede em queda da rede (com carga)	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternated current (Corrente alternada)
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
DC	Direct current (Corrente contínua)
DHI	Diffuse horizontal irradiance (Irradiação difusa horizontal)
DIF	Diffuse irradiance field (Irradiação difusa horizontal)
DNI	Direct normal irradiance (Irradiação normal direta)
GHI	Global horizontal irradiance (Irradiação global horizontal)
GPIO	General purpose input/output (Entrada/saída de propósito geral)
NBR	Normas Brasileiras
USB	Universal serial bus (Porta serial universal)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

i_c	Corrente de coletor
I_s	Corrente de saturação
v_{BE}	Tensão entre base e emissor
V_T	Tensão térmica
α_R	Ganho de corrente reversa em base comum
v_{BC}	Tensão entre base e coletor
i_B	Corrente de base
β_F	Ganho de corrente em emissor comum
β_R	Ganho de corrente reversa em emissor comum
\ln	Logaritmo neperiano
v_{CESAT}	Tensão de saturação entre coletor e emissor

LISTA DE UNIDADES

A	ampere
GW	Gigawatt
Hz	hertz
kWh	Quilowatt-hora
TWh	Terawatt-hora
V	volt
W	watt
Wh	Watt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	Justificativa	17
1.4	Estado da arte	18
1.4.1	História da energia solar	18
1.4.2	Trabalhos relacionados	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Corrente contínua e corrente alternada	20
2.2	Banco de baterias	20
2.3	Energias renováveis	22
2.4	Funcionamento do módulo solar fotovoltaico	23
2.5	Funcionamento sistema <i>On-Grid</i>	25
2.6	Funcionamento sistema <i>Off-Grid</i>	26
2.7	Energia solar no Brasil e no Paraná	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais	32
3.1.1	Arduino uno	32
3.1.2	Ponte H	33
3.1.3	Tina-ti	33
3.2	Metodologia	34
3.2.1	Funcionamento do sistema	34
3.2.2	Instalação	35
3.2.3	Execução.....	35
3.3	Desenvolvimento	37
3.3.1	Inversor.....	37
3.3.2	Simulador da rede elétrica	41
3.3.3	Solução completa	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

4.1	Testes sem carga	45
4.2	Testes com carga	47
4.3	Discussão dos resultados	50
5	CONCLUSÃO	51
5.1	Dificuldades encontradas	51
5.2	Trabalhos futuros.....	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE.....	56
	APÊNDICE A – FIRMWARE.....	57

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os conceitos preliminares para a elaboração deste documento, organizados a partir de contextualização, objetivos gerais e específicos, justificativa e estado da arte.

1.1 Contextualização

O sistema fotovoltaico tem sido amplamente utilizado na sociedade, devido ao custo-benefício e por ser uma fonte de energia renovável, pois estamos em uma época da sociedade em que essa conscientização sobre o meio ambiente está em alta.

Atualmente, o tempo de retorno de investimento para instalação de um sistema de energia solar é baixo. Para os clientes do grupo B, que são os consumidores de energia de baixa tensão, é necessário cerca de 3 a 5 anos para que o sistema fotovoltaico instalado tenha retorno, porém é algo recente. Os primeiros sistemas fotovoltaicos dispendiam mais de 15 anos para esse retorno (ELYSIA, 2022)

Esse retorno se dá pelo fato de haver a possibilidade de fornecer o excedente de energia produzida para a concessionária, onde são obtidos créditos que abatem na fatura de energia elétrica, além do fato do usuário possuir uma segunda fonte de geração de energia (ANEEL, 2015).

Contudo, ainda existe um grande problema nos sistemas *On-Grid* utilizados atualmente, que é a queda de energia da rede da concessionária. Nesses casos, o sistema fotovoltaico deixa de funcionar, pois não é permitido injetar energia na rede desenergizada, pois isso pode causar acidente para os operadores que forem realizar a manutenção na rede externa à residência da unidade geradora. Porém, essa tecnologia de anti-ilhamento já está presente nos inversores *On-Grid*.

Tendo em vista esse problema, o tema de estudo deste trabalho será o projeto de um sistema fotovoltaico híbrido, onde atuará tanto conectado à rede, quanto isolado, deixando a unidade de consumo funcionando independentemente do estado da rede elétrica da concessionária local.

O sistema fotovoltaico híbrido funcionará de maneira a unir o sistema fotovoltaico *On-Grid* e o *Off-Grid*, onde serão utilizados os benefícios dos dois modelos.

Para isso, o sistema produzido será capaz de identificar a presença ou ausência da rede elétrica e em seguida conseguirá isolar a unidade consumidora nos casos de ausência e troca da alimentação para um banco de baterias.

O corte da energia entre a rede e a unidade consumidora será feito através de tiristores de alta potência, a fim de conseguir sincronizar a saída do inversor com a rede nesses casos de chaveamento do modo de sistema utilizado, simulando um inversor *On-Grid* que já realiza essa comunicação.

Além da instalação de ambos os sistemas, será necessária também a presença de dois quadros de energia para a unidade consumidora, no qual um deles é associado ao sistema *On-Grid* e é responsável pelo gerenciamento de cargas pesadas. O outro é conectado ao sistema *Off-Grid*, que terá o controle de cargas mais leves, uma vez que esse sistema será utilizado apenas para cargas específicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo é desenvolver a prova de conceito, em forma de um protótipo fotovoltaico híbrido, capaz de operar como um sistema *On-Grid* durante a alimentação normal da rede elétrica e que também seja capaz de identificar uma queda da rede, mudando seu modo de operação para um sistema *Off-Grid*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um circuito ponte H para acionamento de carga de forma bidirecional;
- Elaborar um *firmware* (Apêndice A) para controlar a saturação dos transistores bipolares de junção e tiristores, responsáveis pelo acionamento da carga na ponte H;
- Elaborar uma solução para desacoplamento do inversor à rede, em caso de queda de energia;
- Elaborar um circuito para acionamento do banco de baterias, durante o período de interrupção de fornecimento de energia;
- Elaborar uma solução para o desacionamento do banco de baterias quando a alimentação for restabelecida;
- Desenvolver uma solução para acoplar o inversor à rede elétrica após o restabelecimento do fornecimento de energia.

1.3 Justificativa

A utilização de módulos solares fotovoltaicos, algo que antes era considerado caro e utópico, está cada vez mais presente na sociedade, devido aos benefícios que seu uso traz ao consumidor e a sociedade. As vantagens são a melhor utilização dos recursos naturais, diminuição da demanda de distribuição de energia para a concessionária, geração de energia limpa, redução de perdas em linhas de transmissão e distribuição e rapidez com que o sistema pode ser instalado (PENG, 2016; DINIZ, 2014).

Segundo Calazans (2015), mesmo com empecilhos, como o alto custo de instalação e uma grande complexidade de operação da rede de distribuição, devido ao fluxo bidirecional de energia que requer uma rede inteligente para se obter um controle otimizado, a energia fotovoltaica consegue ter um retorno financeiro rápido no Brasil, pois ao mesmo tempo que deixa de consumir energia da rede elétrica, reduzindo, assim, a fatura mensal, consegue injetar na rede o excedente. Isso resulta em créditos com a companhia elétrica, seja para pagar outras faturas ou consumir no período em que o painel solar não esteja funcionando.

Com a necessidade de novas fontes de energia renováveis, existe a previsão de que em 2035 a energia solar fotovoltaica seja responsável pela geração de 846 TWh (ELLABBAN, 2014). Então, no contexto de sua tendência de crescimento, tem-se como proposta criar uma solução para a principal limitação em se utilizar a energia solar fotovoltaica *On-Grid*.

No caso de uma queda na rede elétrica da rede, não será possível realizar a injeção do excedente gerado pelo sistema fotovoltaico na rede local, pois pode causar acidentes com operadores da concessionária que estão realizando a manutenção na linha da região. Logo, a residência ficará sem energia, uma vez que não há um método de armazenamento da energia excedente para o modo *On-Grid* (OMAR, 2019; SREEDEVI, 2016).

Tendo em vista esse problema, a solução ideal seria a utilização de um banco de baterias que consiga armazenar uma parte da energia gerada pelo sistema fotovoltaico, suprimindo a necessidade da residência nesses casos atípicos. Para estimar a capacidade desse banco de baterias, deve-se levar em conta a energia consumida e autonomia em períodos que a carga deverá suportar. Este cálculo que pode ser estimado de acordo com o histórico de consumo de energia mensal, suportado por um período médio de 12 (doze) horas de autonomia, período sem incidência solar (DIAZ, 2012).

Realizada essa mudança, obtém-se um sistema de geração de energia fotovoltaica denominado híbrido, sendo capaz de manter o estabelecimento energizado todo o período, seja

por consumo da rede em momentos que o painel não esteja fornecendo energia suficiente (*On-Grid*) ou pelo uso das baterias nos casos de queda na rede (*Off-Grid*).

1.4 Estado da arte

1.4.1 História da energia solar

A História da energia solar fotovoltaica tem início em 1839, quando Alexandre Edmond Becquerel, um físico francês, descobriu o efeito fotovoltaico, que é a geração de uma corrente elétrica quando ocorre a exposição de um material semicondutor à luz. Porém, a primeira célula fotovoltaica foi feita apenas em 1883, por Charles Fritts, que consistia em selênio revestido de ouro. No entanto, a eficiência de produção energética era de 1% (ROCHA, 2015).

Em 1905, Albert Einstein aprofundou ainda mais os estudos nesse tema e apresentou a teoria do efeito fotoelétrico, descoberto por Heinrich Hertz em 1887, que é o princípio de emissão de elétrons de uma superfície ao receber uma onda eletromagnética, rendendo o prêmio Nobel em 1922.

Porém, a teoria do efeito fotovoltaico surgiu apenas em 1930, feita por Walter Schottky, um físico alemão, que logo em seguida criou a primeira célula fotovoltaica de mono-silício. Dois anos depois, foi utilizado por Audobert e Stora, o seleneto de cádmio (CdSe) para a geração do efeito fotovoltaico.

Em 1954 houve um grande avanço na produção de energia solar, pois novas técnicas foram desenvolvidas, como o processo de dopagem do silício, que deu origem as células solares modernas. A partir de 1958, começou a utilização dos painéis solares, quando foi instalado em um satélite enviado ao espaço. A função desse painel de 1W era de alimentar o rádio de comunicação (ROCHA, 2015).

Porém, uma maior eficácia de conversão de energia começou em 1992 com a criação da célula de filme fino na Universidade da Flórida do Sul, que alcançou uma marca de 15,89% de eficácia. Dois anos depois, a *National Renewable Energy Laboratory* alcançou 30% de eficiência.

Em 1999, foi alcançado o valor de 1000MW de capacidade total de energia fotovoltaica instalada no mundo. A partir do ano 2000 surgiu o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e 6 anos depois as células solares de poli-silício atingiram uma eficiência de 40%.

A partir de 2011 as instalações de módulos solares cresceram no mundo inteiro, pois o que era antes considerado um produto de primeiro mundo, agora estava sendo produzido com custos mais baixos com a expansão das fabricas solares na China.

1.4.2 Trabalhos relacionados

O sistema fotovoltaico híbrido não é uma novidade no cenário mundial, mas é um tema que ainda está em desenvolvimento. Em 2011, um modelo híbrido foi proposto por 3 engenheiros na universidade de Pamplona na Colômbia, em um artigo de ciência e tecnologia.

Em 2021, ainda era proibido pela ANEEL o uso do sistema híbrido no Brasil, porém já existiam deliberações para a inclusão desse modelo de geração de energia.

Porém, mais recentemente, empresas que atuam no comercio de energia solar já disponibilizam soluções híbridas homologadas pelo INMETRO.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Corrente contínua e corrente alternada

A diferença fundamental entre corrente contínua e corrente alternada é o sentido em que os elétrons percorrem o condutor. Na corrente contínua, os elétrons se movimentam em apenas um sentido. Já na corrente alternada esses elétrons se movem em ambas as direções no condutor. A transmissão da energia elétrica, na maior parte dos sistemas, acontece em corrente alternada. A razão disso é que na corrente alternada a tensão nas linhas de transmissão pode ser maior. Assim, quando chega ao transformador, as perdas são menos perceptíveis do que em corrente contínua. Evidentemente, a tensão produzida na usina é reduzida antes de chegar às unidades consumidoras, através de transformadores que se encontram nos postes em vias públicas de 13.8kV (normalmente), como o mostrado na Figura 1, para 127V ou 220V.

Figura 1 - Transformador de média potência



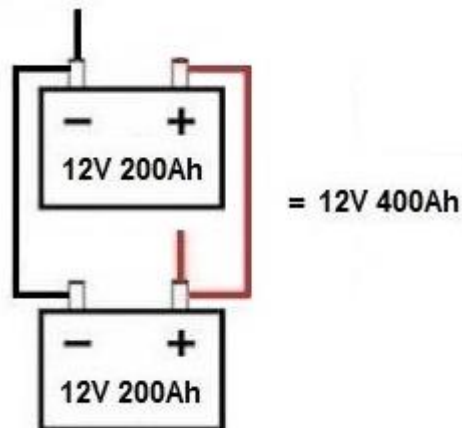
Fonte: WEG (2022).

2.2 Banco de baterias

O banco de baterias é um sistema utilizado para armazenamento de energia e alimentação de um circuito isolado.

A Figura 2 representa um conjunto de baterias estacionárias, ligadas em configuração paralela (mas pode ser mista - combinação série e paralelo), formando o chamado “banco de baterias”.

Figura 2 - Associação de baterias em paralelo

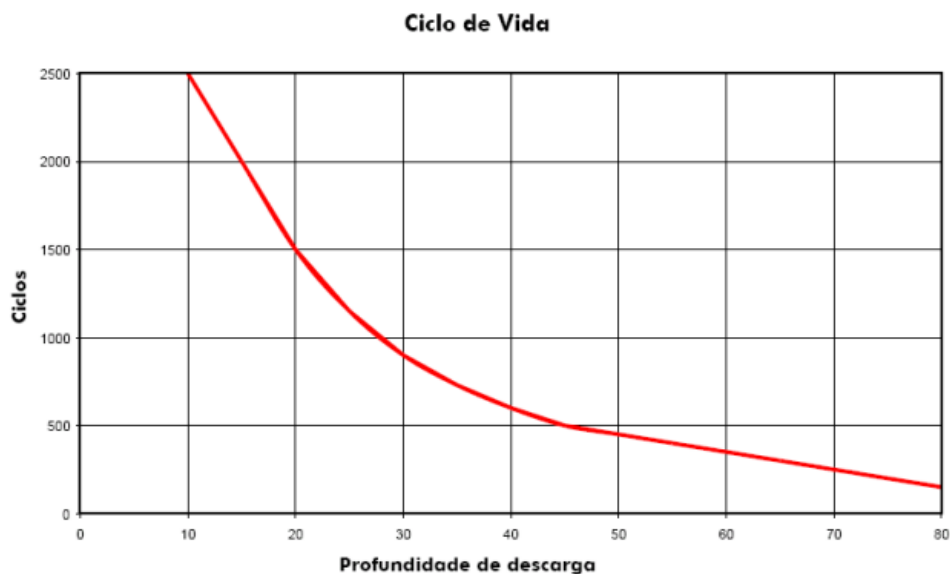


Fonte: mpptsolar (2022).

A bateria estacionária é um modelo utilizado em operações que necessitam uma corrente constante por um longo período, além de suportar descargas altas por vários ciclos, e é composta por uma liga de chumbo-ácido (MOURA, 2019).

A Figura 3 mostra uma comparação entre o nível de descarga e a quantidade de ciclos que a bateria aguenta, sendo que o ciclo é a descarga e a carga até a tensão nominal. No eixo Y está representado os ciclos de vida da bateria e no eixo X a profundidade da descarga da bateria. Percebe-se que quanto maior a descarga que a bateria sofre, menor sua vida útil.

Figura 3 - Ciclo de vida da bateria estacionária



Fonte: Freedom (2008).

Para realizar a montagem do banco de baterias é necessário levar em conta a carga que será alimentada, para assim poder realizar o cálculo da capacidade de armazenamento necessária.

2.3 Energias renováveis

Atualmente, dois dos principais temas de debate da sociedade global são o consumo de energia consciente e a preservação do meio ambiente. Ambos se complementam, pois através desses temas que as energias renováveis passam a ser discutidas. (EPE, 2022).

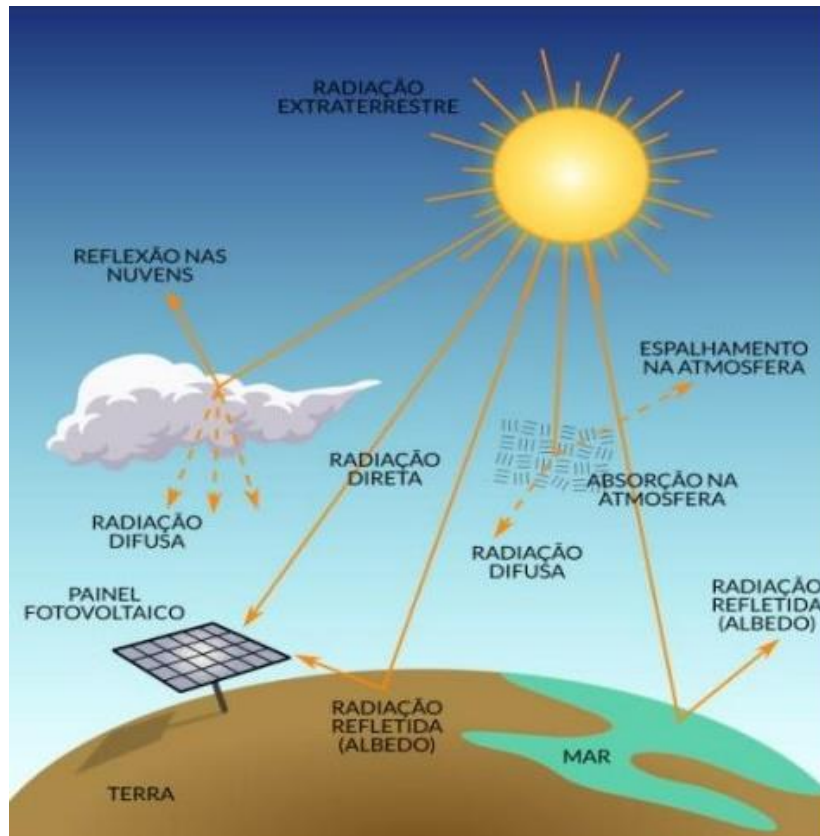
Com o passar dos anos, a tecnologia vem avançando de maneira que é possível produzir energias consideradas limpas, pois além de gerarem uma quantidade de resíduo poluente muito inferior às energias fósseis, utilizam-se de fontes inesgotáveis para essa geração, como a energia eólica, a hídrica, a solar e muitas outras.

A energia solar pode ser utilizada de diversas maneiras, como em painéis coletores térmicos, os quais aquecem a água em seu interior, podendo ser utilizadas para uso residencial ou industrial. Outro método seria gerar eletricidade através de usinas heliotérmicas, onde existem diversos espelhos que concentram a luz solar em um único ponto, aquecendo a água até que atinja o ponto de ebulição, fazendo com que o vapor gerado seja capaz de girar uma turbina, gerando eletricidade (EPE, 2022).

Por fim, a geração de eletricidade por meio de painéis solares, que captam toda radiação emitida pelo sol (Irradiação Global Horizontal - GHI), é toda energia captada por uma superfície plana horizontal (MARTINS, 2017).

A Figura 4 representa os modelos de irradiação e como eles ocorrem, sendo que os principais modos que influenciam na geração de energia são a irradiação direta e a difusa.

Figura 4 - Representação dos meios de radiação solar



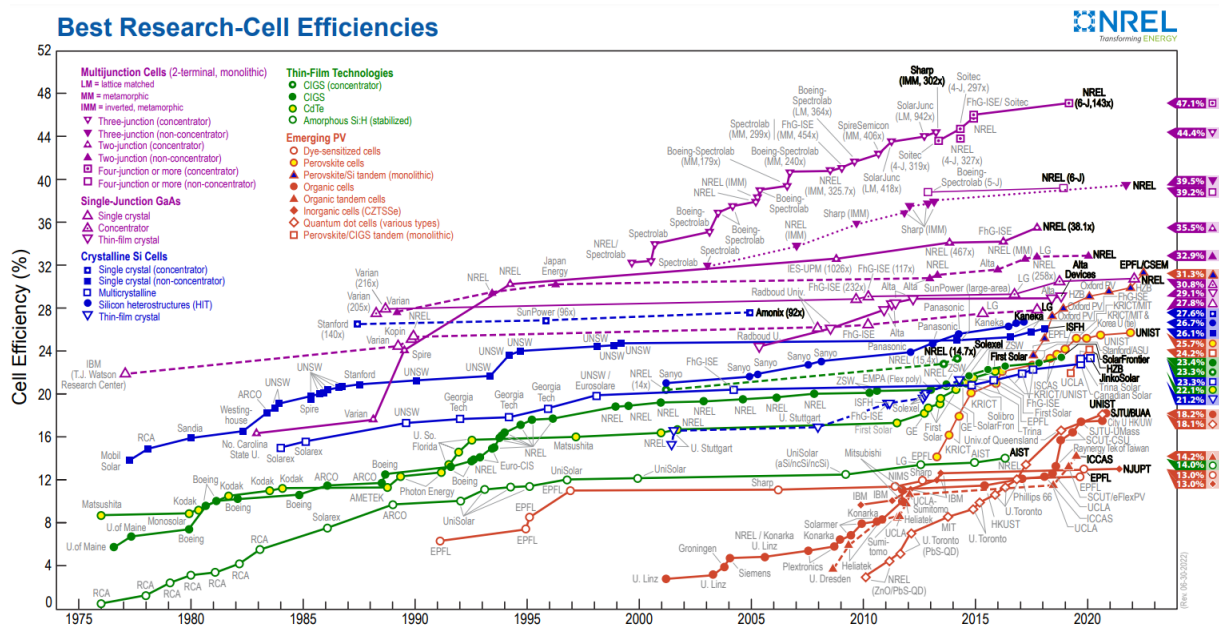
Fonte: Instituto solar (2020).

A irradiação ocorre principalmente de duas maneiras: a primeira é chamada de Irradiação Difusa Horizontal (DIF), pois os raios solares não atingem o painel solar de forma direta. Isso geralmente ocorre em dias nublados, onde há dispersão e refração, diminuindo a intensidade da irradiação e representa em torno de 5% da geração de energia pelo módulo solar. A segunda é o modo que ocorre em dias limpos, ou Irradiação Normal Direta (DNI), onde não ocorre a atenuação da irradiação e é responsável pela geração de mais de 50% nos módulos solares. (MARTINS, 2017).

2.4 Funcionamento do módulo solar fotovoltaico

Os módulos solares fotovoltaicos podem ser feitos utilizando diferentes tecnologias, o que resulta em diferentes eficiências para a geração de energia elétrica. A Figura 5 mostra a evolução das eficiências de diferentes tecnologias utilizadas para a fabricação do painel solar ao longo dos anos.

Figura 5 - Eficiência dos diferentes tipos de painel solar



O princípio básico de funcionamento de um painel solar é a energia presente nos raios solares para gerar uma corrente elétrica dentro das células.

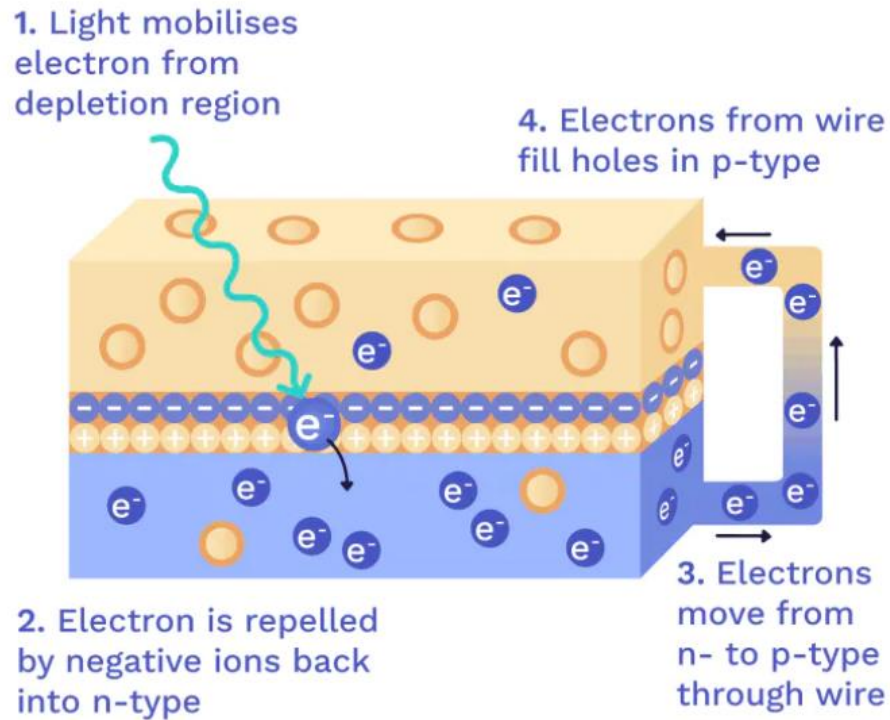
As principais células solares utilizadas, são compostas de vários átomos de silício, que tem nome de células cristalinas, porém são adicionados alguns átomos de fósforo e boro. O silício possui 4 elétrons em sua camada de valência, enquanto o fósforo possui 5 e o boro 3, existindo assim elétrons livres na camada com o fósforo e “buracos” sem elétrons na camada com o boro (CLIMATE SCIENCE, 2022).

Ao receber a irradiação solar, esses elétrons do fósforo se deslocam em direção aos “buracos” nos átomos de boro e que elétrons de camadas de valência, já estabilizados, também saiam, gerando assim uma corrente elétrica entre os terminais da célula.

A Figura 6 representa uma única célula fotovoltaica em funcionamento, em que um raio solar é capaz de criar uma corrente elétrica entre os terminais da célula através do fornecimento de energia para que os elétrons da camada positiva atravessem a região de depleção e cheguem na região negativa, voltando para a primeira região através dos terminais conectados.

Figura 6 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica

Solar Photovoltaic Process



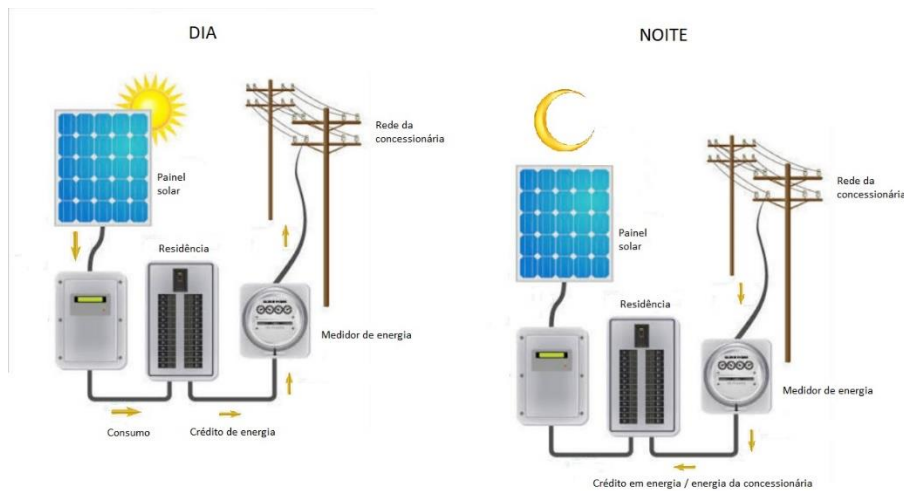
Fonte: Climatescience (2022).

2.5 Funcionamento sistema *On-Grid*

Um dos principais modelos utilizados nos dias de hoje é o *On-Grid* ou *Grid Tie*, que é um sistema solar implementado juntamente à rede elétrica.

Esse sistema é capaz de produzir energia suficiente para alimentar toda a unidade consumidora durante o período diurno, enquanto o período noturno retorna a utilizar energia da rede elétrica.

Na Figura 7 é possível comparar o sistema durante o dia, em que o painel solar está gerando energia e a noite em que a energia da residência provém da rede elétrica.

Figura 7 - Funcionamento painel On-Grid

Fonte: Energyshop (2022).

Durante a presença de luz solar, o sistema fotovoltaico é capaz de produzir energia elétrica e, com isso, a unidade consumidora se utiliza dessa energia para manter os equipamentos ligados. Caso a energia produzida seja menor que a energia consumida, a rede elétrica fornece o restante para o consumo. Porém, se o consumo for menor que a energia gerada pelos módulos solares, o excedente é injetado novamente na rede e gera créditos para compensação de próximas faturas. Historicamente, nos meses de outubro a março é gerado uma maior quantidade de energia solar. Já, nos meses de abril a setembro é gerado menos.

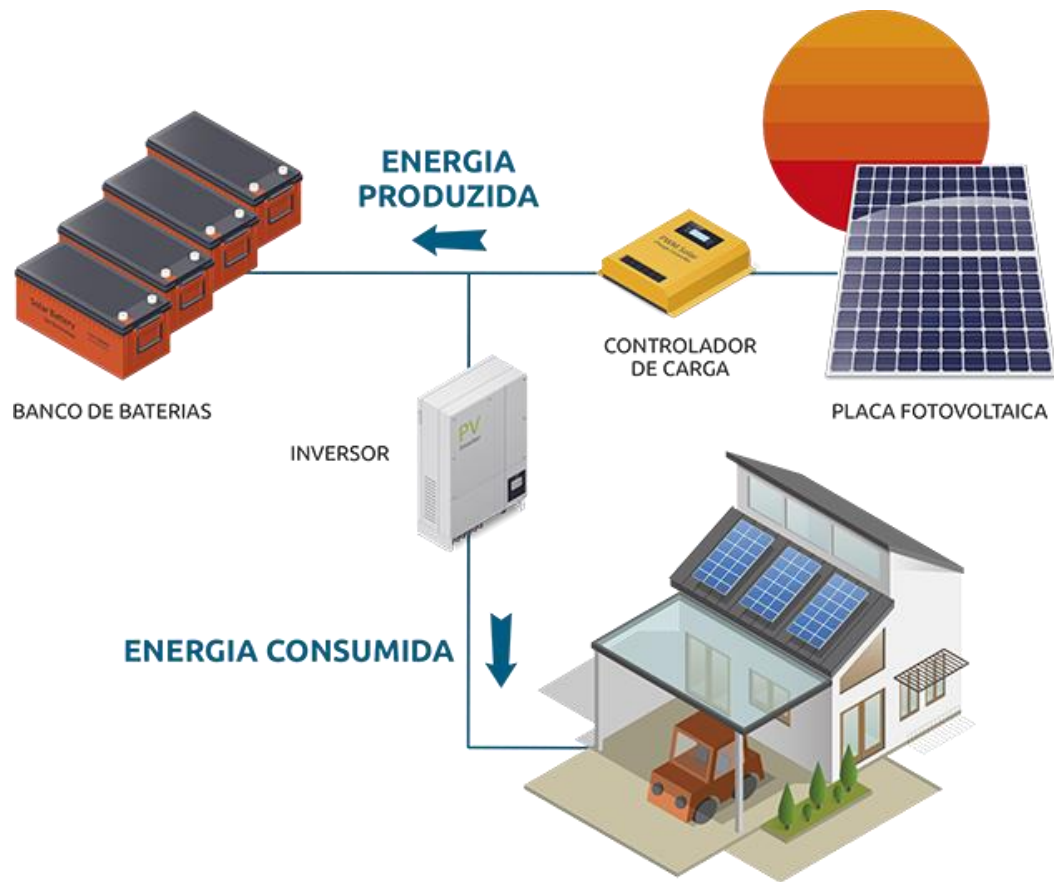
Nesse modo, são utilizados apenas os painéis solares e o inversor, que transforma a energia elétrica produzida de CC para CA, além de sincronizar com a rede elétrica da concessionária. Para devolver à rede são necessárias ambas estarem em fase, ou seja, com mesma amplitude, frequência e ângulo de fase (ABNT NBR IEC 62116, 2012).

2.6 Funcionamento sistema *Off-Grid*

O segundo método, também bastante utilizado, é o *Off-Grid* ou autônomo, que é um sistema totalmente independente e isolado da rede elétrica.

A Figura 8 representa a disposição dos componentes em um sistema fotovoltaico autônomo. O fluxo de energia produzido pelo painel solar é dividido em dois segmentos: a energia armazenada no banco de baterias e a energia consumida.

Figura 8 - Funcionamento painel Off-Grid



Fonte: Ecoaquecedores (2022).

O sistema isolado ou *Off-Grid*, durante a presença de luz solar, tem o funcionamento análogo ao *On-Grid*, em que o painel é capaz de alimentar a residência. Contudo, a diferença está no excedente produzido, que é armazenado em um banco de baterias estacionárias. Estas serão a fonte de energia da unidade consumidora durante o período em que os módulos não estão produzindo. O inversor do sistema *Off-Grid* possui um controlador de cargas integrado (OMAR, 2019).

Para utilizar um banco de baterias junto de um painel solar é necessária a presença de um controlador de carga, responsável por controlar a carga e descarga das baterias, evitando sobrecargas ou descargas abruptas. Isso prolonga a vida útil desses componentes, além de diminuir as perdas, resultando em um armazenamento mais eficiente (REITER, 2014).

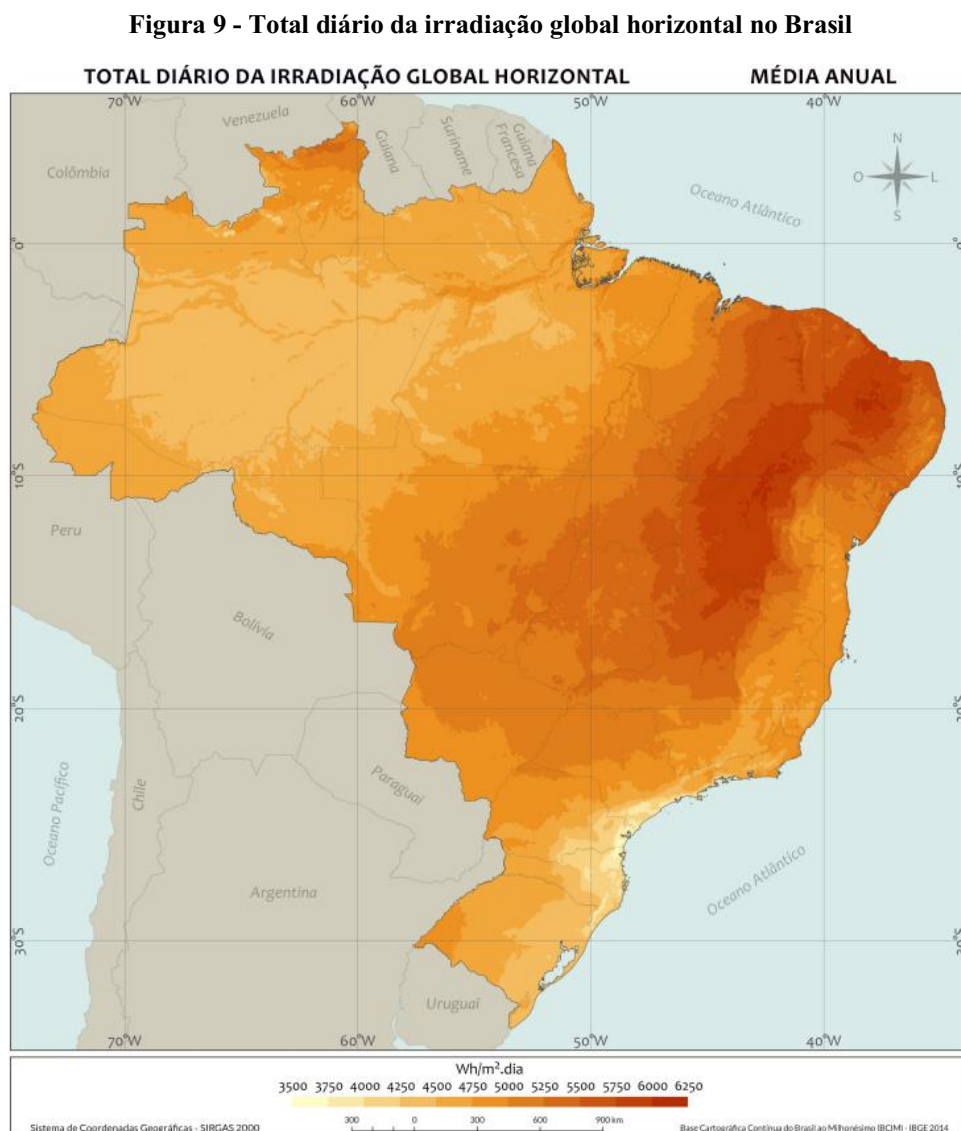
Também é necessário um quadro de energia para as cargas que serão alimentadas pelo sistema, uma vez que haverá uma restrição nas cargas, a fim de reduzir a dimensão e custo do banco de baterias.

2.7 Energia solar no Brasil e no Paraná

O Brasil, classificado como quinto maior país do mundo em extensão, possui cerca de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, que permite explorar muito bem essa tecnologia crescente na sociedade.

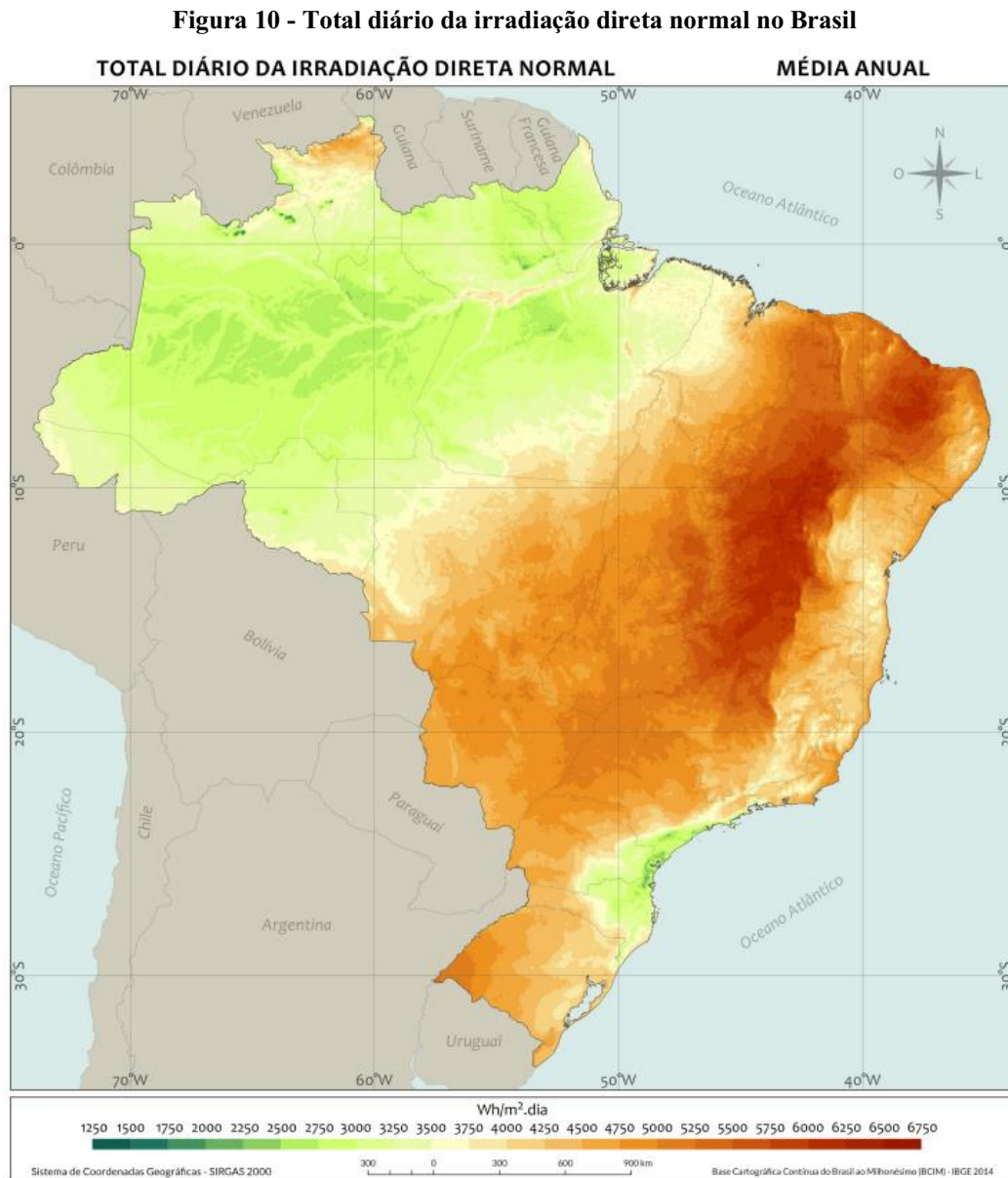
Até março de 2022, o Brasil registrou quase 15 GW de capacidade total de energia solar instalada. Em novembro desse mesmo ano, esse número atingiu a marca dos 22 GW, o que mostra que o mercado de energia solar está crescente e cada vez mais estável (CBIC, 2022).

Na Figura 9, é possível observar uma média anual de irradiação global horizontal diária e identificar as regiões no Brasil que mais recebem radiação solar.



Fonte: Martins (2017).

Na Figura 10 é mostrada uma média anual de irradiação direta normal, que é a principal para a geração de energia pelos painéis solares. Através do mapa é possível saber as melhores regiões de instalação de painel solar no Brasil.



Fonte: Martins (2017).

Mesmo com altos índices de GHI diário em todo o Brasil, há regiões em que a DNI não é a principal componente dessa irradiação global, pois são regiões que possuem matas fechadas, tempos encobertos e partículas no ar que causam a reflexão e/ou refração dos raios solares (MARTINS, 2017).

Em estados do nordeste, centro-oeste e sudeste do Brasil, as componentes de irradiação direta normal compõem quase que completamente a irradiação global horizontal, pois são

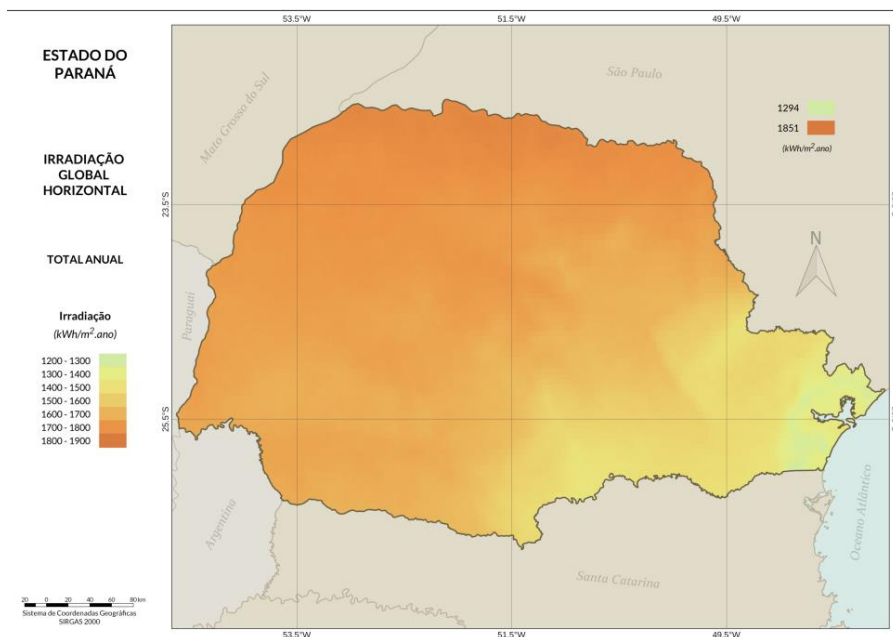
regiões mais secas e com menos nuvens. Já os estados do Norte e Sul possuem o clima mais chuvoso, que faz com que haja a presença de mais nuvens e conseqüentemente uma maior difusão da irradiação solar (MARTINS, 2017).

O Paraná ainda tem como fonte principal de energia as usinas hidrelétricas, porém elas não possuem expansão, pois além de ser inviável financeiramente, resultaria em grandes impactos ambientais.

A expansão da matriz de energia solar no Paraná está ocorrendo de forma gradativa. Em 2013 era praticamente inexistente a presença de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Já em março de 2022, o estado ocupa em sexto lugar no ranking de estados que mais geram energia solar no país, contribuindo com mais de 5% de toda energia produzida no Brasil.

Na Figura 11 está representado o total anual de irradiação global horizontal no Paraná, onde o máximo chega a quase 1900 kWh/m².ano no norte, enquanto o mínimo se aproxima de 1300 kWh/m².ano no extremo leste.

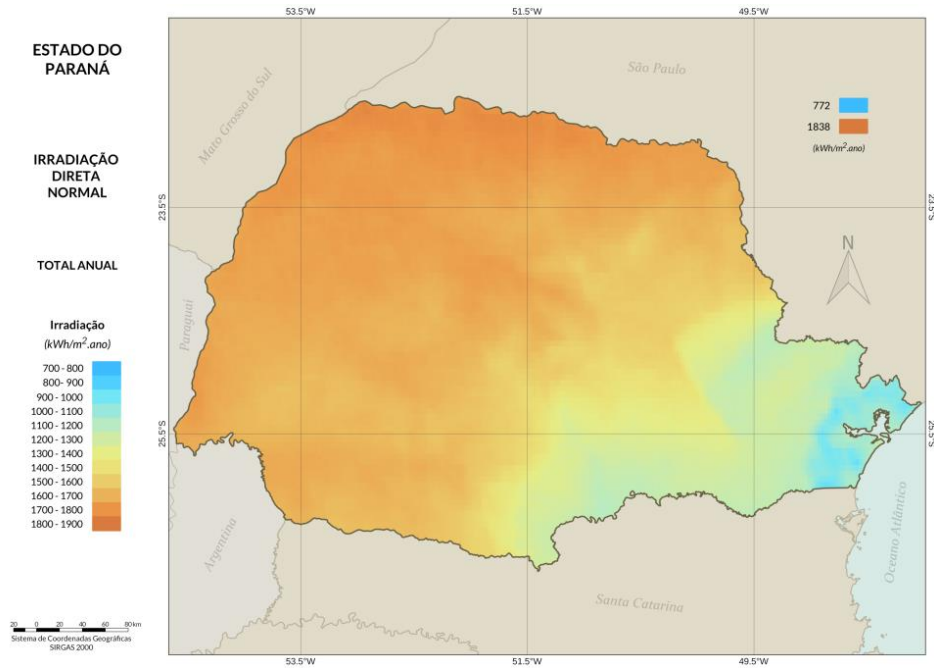
Figura 11 - Total Anual de Irradiação Global Horizontal no Paraná



Fonte: Tiepolo (2018).

O total anual de irradiação direta normal pode ser observada na Figura 12 e segue o mesmo padrão da irradiação normal horizontal. Porém, no litoral é menos intensa, uma vez que possui o clima mais encoberto.

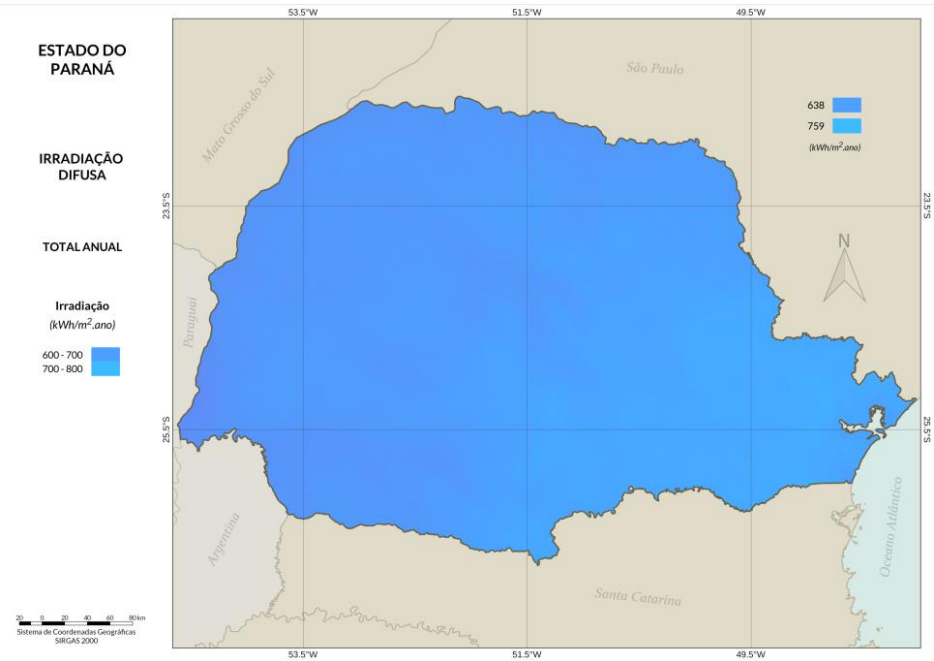
Figura 12 - Total Anual de Irradiação Direta Normal no Paraná



Fonte: Tiepolo (2018).

Enquanto o mapa da Figura 13, que representa o total anual de irradiação difusa, mostra que é quase uniforme esse modelo de irradiação no Estado do Paraná.

Figura 13 - Total Anual de Irradiação Difusa no Paraná



Fonte: Tiepolo (2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo faz referências aos materiais e conceitos utilizados para a realização deste trabalho, assim como as etapas de desenvolvimento do projeto.

Por se tratar de um projeto que aciona cargas de forma bidirecional, foi necessário projetar um sistema de potência em ponte H com um microcontrolador.

3.1 Materiais

Nessa seção serão referenciados os materiais e ferramentas utilizadas no desenvolvimento desse projeto.

3.1.1 Arduino uno

Arduino Uno, representado na Figura 14, é uma placa que possui o ATmega328p como microcontrolador. Ele dispõe de 14 GPIOs digitais, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz de frequência e pode ser alimentada tanto através de um cabo USB, como também por uma fonte de alimentação DC de 7V a 12V (recomendado). Sua tensão de operação é de 5V (Arduino, 2022).

Figura 14 - Arduino Uno

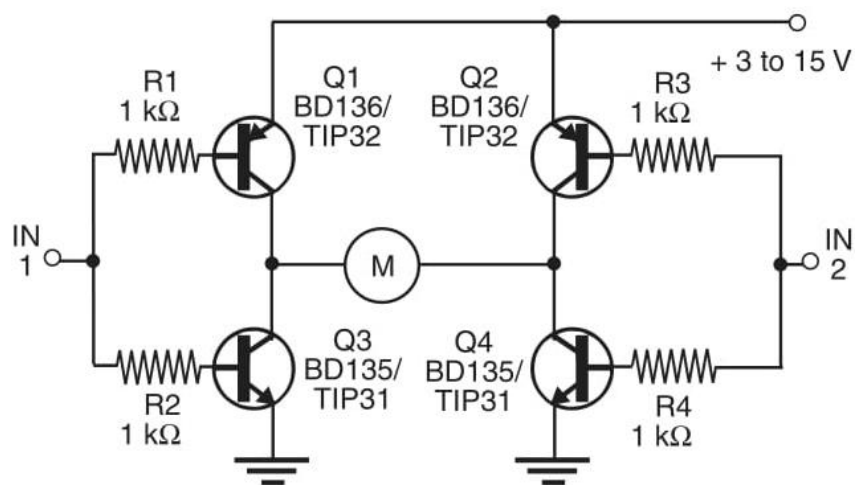


Fonte: Arduino (2022).

3.1.2 Ponte H

A Ponte H é um circuito que permite a variação do sentido da corrente em uma carga, como um motor DC, por exemplo, fazendo com que ele gire tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário. A Figura 15 mostra um exemplo de ponte H com transistores de potência, similar à que foi utilizada na execução do projeto. A diferença está nos modelos dos transistores. No projeto foram utilizados o TIP122 e o TIP127.

Figura 15 - Exemplo de Ponte H



Fonte: Instituto Newton C. Braga (2020).

3.1.3 Tina-ti

O software de simulação TINA-TI é uma poderosa ferramenta de design de circuitos e simulação. É ideal para desenvolver, testar e solucionar problemas de uma ampla variedade de circuitos básicos e avançados, incluindo arquiteturas complexas, sem limitação de nós ou número de dispositivos (TEXAS INSTRUMENTS, 2008). Essa foi a ferramenta escolhida para a realização das simulações necessárias para a execução do projeto, pois é um software livre e já foi previamente utilizado em algumas disciplinas da UTFPR.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Funcionamento do sistema

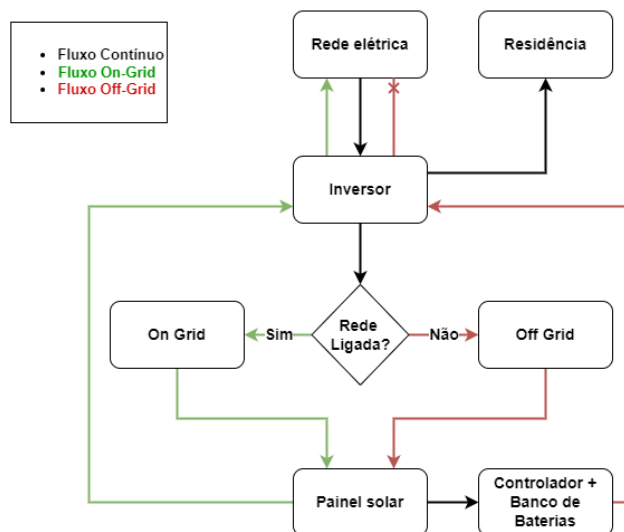
O sistema final é resultante da união dos sistemas já existentes, *On-Grid* e *Off-Grid*, no qual a unidade consumidora em que possuir o sistema fotovoltaico híbrido conseguirá identificar automaticamente a presença de energia provida da rede e realizar o chaveamento entre os sistemas.

No caso de presença de energia da rede, o sistema funcionará como um sistema *On-Grid*, no qual, além de consumir a energia que é produzida pelos módulos, é possível injetar na rede elétrica o excedente, obtendo créditos com a concessionária.

Ao ser identificada uma queda de energia, o sistema começa a atuar primeiramente desacoplando os terminais da carga provendo um isolamento do sistema de alimentação *Off-Grid* do circuito de alimentação AC da rede elétrica, isso é feito através de relés e tiristores. Ao ser restabelecido o funcionamento da rede, o sistema identifica automaticamente esse evento, e então refaz o acoplamento do inversor para com a rede, possibilitando novamente a inserção da energia elétrica excedente gerada pelo painel solar na rede, gerando créditos ao usuário.

A Figura 16 é um fluxograma que mostra o funcionamento básico e lógico do sistema fotovoltaico híbrido, nele pode-se observar todos os elementos do sistema híbrido e as situações de tomada de decisão que o sistema faz automaticamente.

Figura 16 - Fluxograma de funcionamento do circuito



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.2 Instalação

O sistema deve ser composto por painéis solares. O controlador que seria a central de processamento do inversor, pelo banco de baterias e pelo inversor.

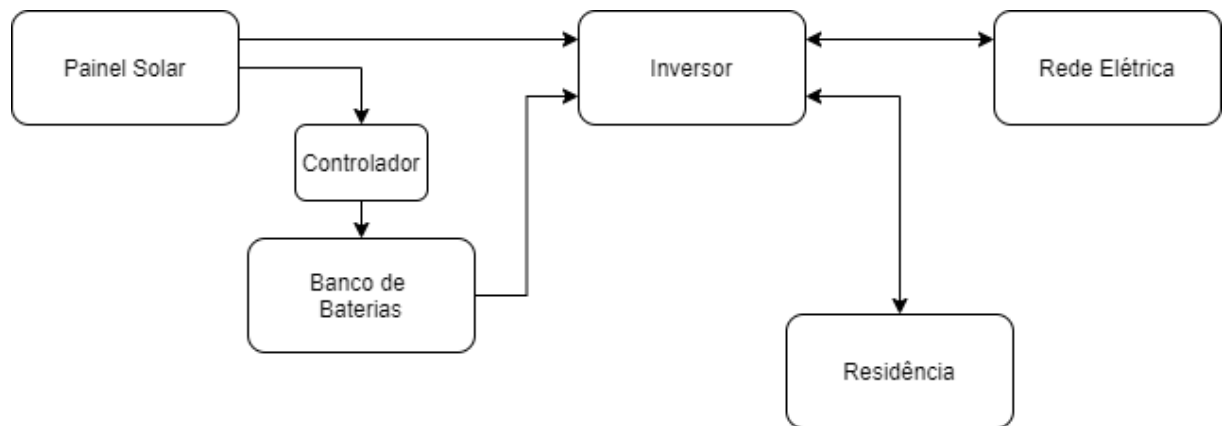
O inversor é responsável por transformar a energia solar, que chega em corrente contínua em corrente alternada sincronizada com a rede elétrica, para alimentar toda a unidade consumidora.

O controlador serve como um dispositivo de proteção para a carga da bateria através do painel solar, onde limita a corrente fornecida.

O banco de baterias funcionará como fornecedor de energia para o estabelecimento em casos de falha na rede, porém passará pelo inversor para ser transformado em corrente alternada.

A Figura 17 mostra um diagrama de como o sistema fotovoltaico híbrido deve ser instalado. O painel solar deve fornecer energia em corrente contínua ao inversor e ao banco de baterias. O inversor fornece energia em forma de corrente alternada para a residência e, se houver excedente, deve fornecer para a rede elétrica também. O controlador é um dispositivo de proteção para o banco de baterias para evitar picos de tensão e outros fenômenos que possam vir a causar danos ao banco de baterias.

Figura 17 - Diagrama de instalação dos componentes do sistema



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.3 Execução

Para a execução do projeto, inicialmente foi feito o projeto teórico do circuito de chaveamento, assim como as devidas simulações. Após isso, foi desenvolvido o *firmware* que controla os transistores das pontes H e foram executados testes para verificar que o microcontrolador estava controlando corretamente o sistema.

Após os testes do microcontrolador, foi montada então a placa do circuito de chaveamento em uma placa universal. Após essa montagem foi feita a integração de todo o circuito com o microcontrolador e os relés responsáveis pelo desacoplamento dos terminais de carga para com o resto do circuito.

Após a montagem de todo o sistema, foram executados testes de funcionamento básico, para se certificar que o sistema funcionava minimamente, e então foram executados testes de performance do sistema. Esses testes foram executados com o auxílio de um osciloscópio.

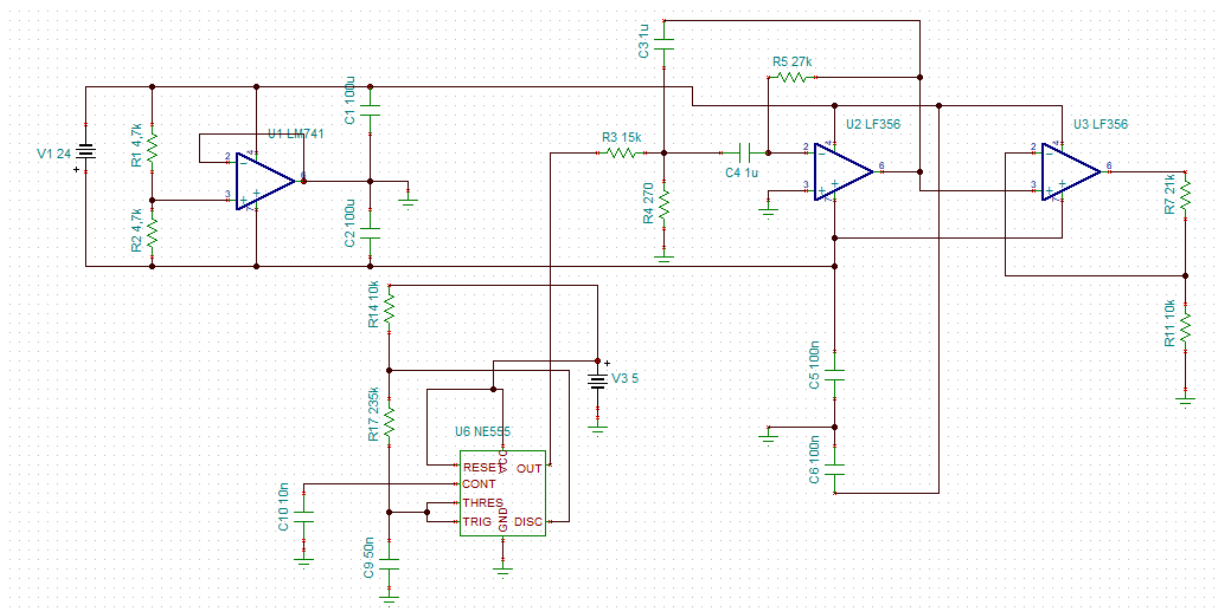
3.3 Desenvolvimento

3.3.1 Inversor

A finalidade do inversor é transformar corrente contínua em corrente alternada, ou seja, transformar a corrente contínua produzida pelo banco de baterias para corrente alternada fornecida pela concessionária de energia elétrica.

Como a rede elétrica no Brasil possui a frequência de 60 Hz, inicialmente foi projetado um circuito inversor para transformar uma entrada em tensão DC, em uma senoide com essa frequência. Esse circuito consiste em três amplificadores operacionais, resistores, potenciômetros e capacitores. O responsável pelo *clock* do circuito e conseqüentemente por sua oscilação em 60 Hz, é o temporizador NE555. A Figura 18 mostra o esquemático do inversor projetado com amplificadores operacionais.

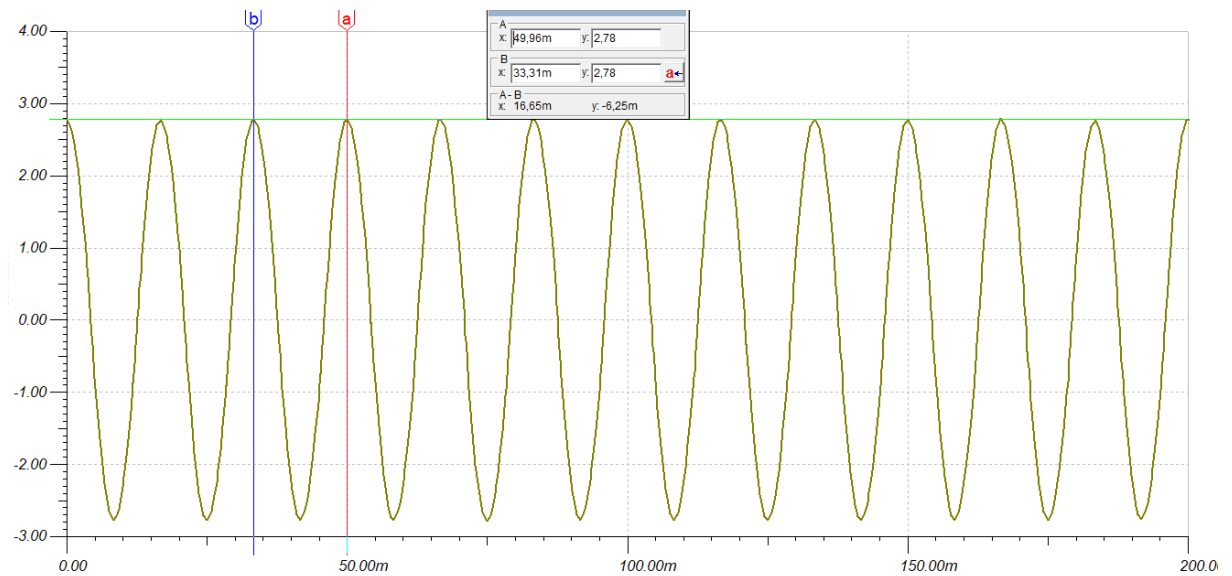
Figura 18 - Esquemático do inversor



Fonte: Autoria própria (2022).

Para averiguar o funcionamento do circuito, foi utilizado o *software* de simulação TINA-TI para a realização das simulações e a partir das simulações foi constatado, como pode-se observar na Figura 19, o inversor entregar em sua saída uma senoide com intervalos de 16,65 ms entre seus picos, o que equivale a uma frequência muito próxima de 60 Hz. As unidades na Figura 19 são volt (eixo y) e milissegundos (eixo x).

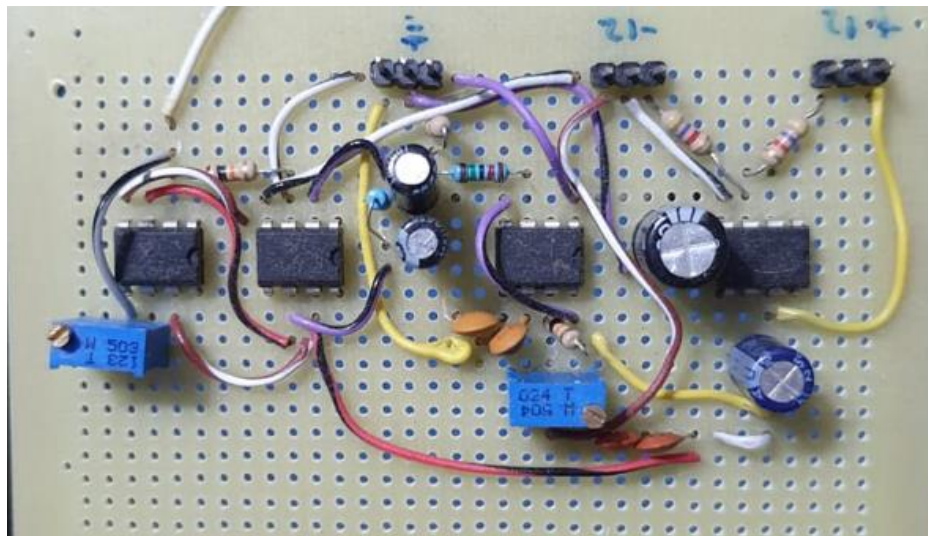
Figura 19 - Simulação do inversor



Fonte: Autoria própria (2022).

A montagem física desse protótipo de inversor, com amplificadores operacionais foi realizada em uma placa universal, utilizando-se componentes comerciais, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Protótipo do circuito do inversor

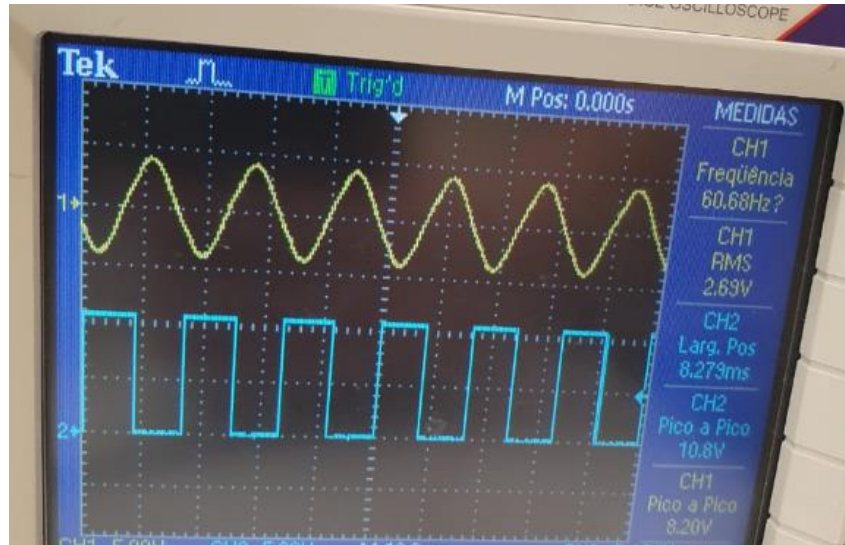


Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 21 mostra, em amarelo, o formato de onda na saída do circuito inversor, cuja montagem pode ser vista na Figura 20. Em azul, observa-se o formato de onda na saída do NE555. Analisando o formato de onda do inversor, é possível observar que a frequência se

aproxima de 60Hz, porém entrega uma tensão insuficiente para o acionamento de uma carga de testes efetiva.

Figura 21 - Saída do inversor

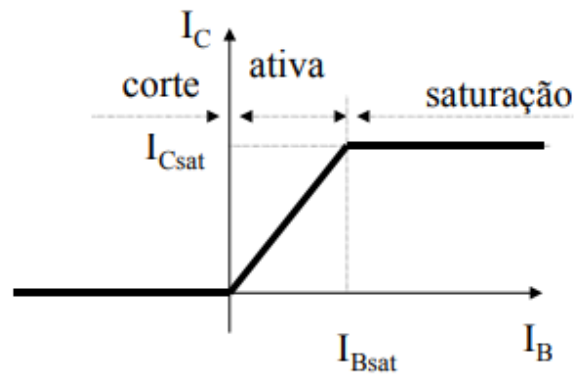


Fonte: Autoria própria (2022).

Os amplificadores operacionais não são componentes utilizados para projetos de eletrônica de potência, o próprio componente LM741 possui uma limitação de corrente de 25mA, (FAIRCHILD, 2001), fato esse que inviabiliza seu uso neste projeto. Por isso, a topologia em ponte H com transistores de potência foi escolhida para a realização do protótipo do sistema híbrido, pois nessa topologia é possível fazer acionamento de cargas de forma bidirecional ao polarizar os transistores. Para o projeto, foram escolhidos os transistores bipolares de junção TIP122 E TIP127.

Para a realização dos acionamentos da ponte H, os transistores foram utilizados nas regiões de corte e de saturação. Ao serem utilizados nessas regiões esses componentes funcionam como chaves eletrônicas. Existe também uma terceira região, que seria a ativa, porém assim usualmente são aplicados em projetos de amplificadores.

Figura 22 - Regiões de trabalho dos transistores



Fonte: IF-UFRJ (2022).

O transistor bipolar de junção obedece às seguintes equações de corrente e tensão para seus terminais de base, coletor e emissor.

$$i_c = I_s \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \frac{I_s}{\alpha_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) \quad (1)$$

$$i_B = \frac{I_s}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + \frac{I_s}{\beta_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) \quad (2)$$

$$v_{BE} = V_T \ln \frac{i_B + (1 - \alpha_R)i_C}{I_s \left[\frac{1}{\beta_F} + (1 - \alpha_R) \right]} \quad (3)$$

$$v_{BC} = V_T \ln \frac{i_B - \frac{i_C}{\beta_F}}{I_s \left[\frac{1}{\alpha_R} \right] \left[\frac{1}{\beta_F} + (1 - \alpha_R) \right]} \quad (4)$$

$$v_{CE} = v_{BE} - v_{BC} \quad (5)$$

Como o estado de polarização desejado é a saturação, temos:

$$v_{CESAT} = V_T \ln \left[\left(\frac{1}{\alpha_R} \right) \frac{1 + \frac{i_C}{(\beta_R + 1)i_B}}{1 - \frac{i_C}{\beta_F i_B}} \right] \quad (6)$$

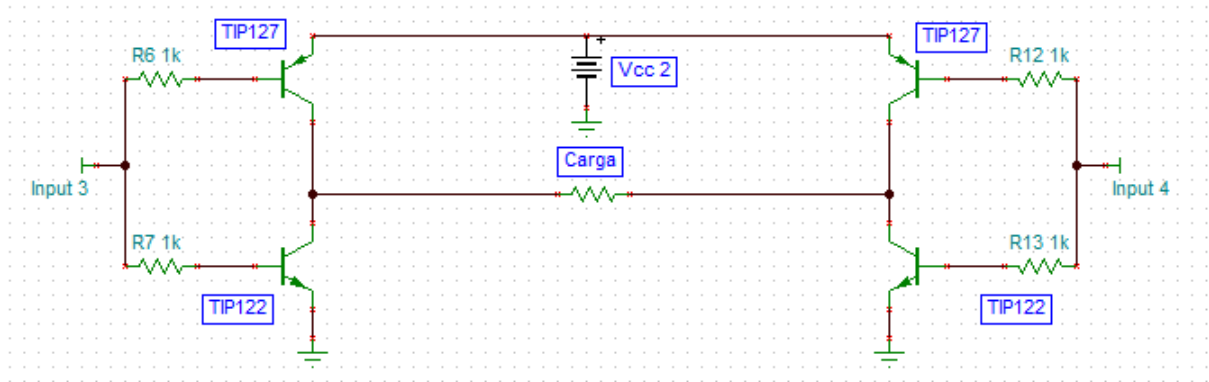
Para:

$$i_B > \frac{i_C}{\beta_F} \quad (7)$$

Quando o valor de i_B supera esse valor o transistor entra em saturação, para a prova de conceito foi utilizada uma lâmpada de 5W de potência, o que resultaria uma corrente máxima

de aproximadamente 400mA, com um $\beta_F = 100$ e resistores de base de 1k Ω . É garantido que, quando aplicado um sinal de 5V na base do transistor, ele entrará em saturação.

Figura 23 - Ponte H transistorizada (Inversor)

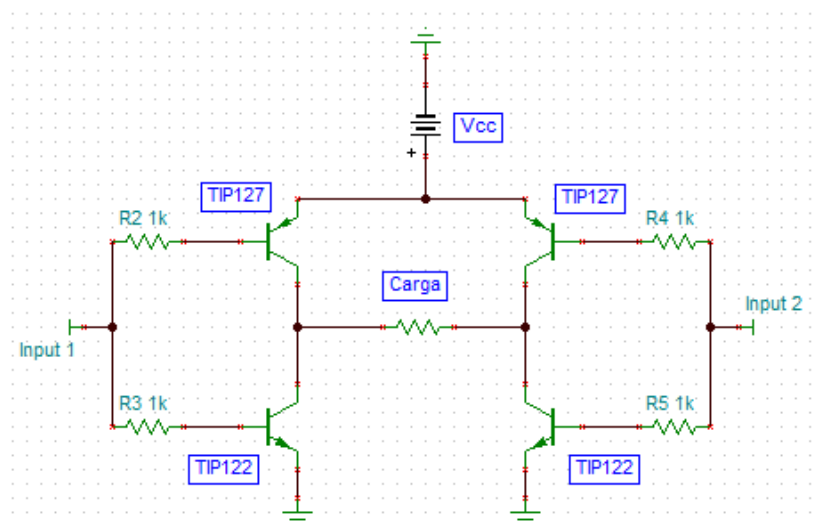


Fonte: Autoria própria (2022).

3.3.2 Simulador da rede elétrica

Para a prova de conceito, a representação do papel da rede elétrica foi também utilizada uma ponte H com transistores de potência. Devido a isso, os formatos de onda da queda de tensão no inversor e da rede elétrica, são ondas quadradas, a fim de aproximar o máximo possível do modelo real da rede elétrica em corrente alternada a frequência dessas ondas quadradas foram arbitradas em 60 Hz para o projeto. A Figura 24 mostra como foi montado o circuito de simulação da rede elétrica, uma implementação de uma ponte H transistorizada.

Figura 24 - Ponte H transistorizada (Rede Elétrica)



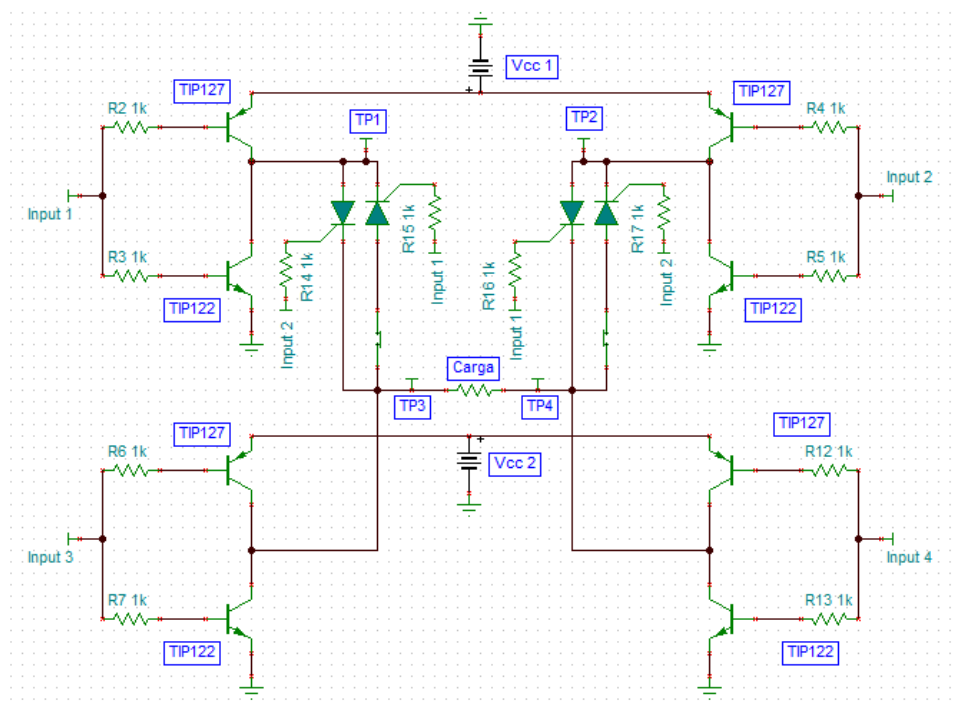
Fonte: Autoria própria (2022).

3.3.3 Solução completa

A solução completa para a prova de conceito é composta da junção dos dois circuitos em ponte H interligados, por meio de tiristores. Estes são disparados juntamente com os sinais de polarização dos transistores, responsáveis pela simulação da rede elétrica. Os *inputs* 1; 2; 3 e 4 são os responsáveis pela polarização da base dos transistores e são gerados por um microcontrolador ATmega328p, em uma placa Arduino Uno. Por estarem sendo gerados via *firmware*, pode-se dizer que existe o sincronismo entre a rede elétrica e o inversor com um atraso mínimo de alguns nanosegundos, visto que o cristal do Arduino Uno possui um *clock* de 16 MHz.

Como pode se observar na Figura 25, existem dois tiristores conectados em antiparalelo para cada lado dos terminais da carga, isso garantiria que em um semiciclo da rede além da corrente fluir em uma direção. O inversor seria capaz de injetar energia na rede elétrica, e, em casos de queda de energia da rede, os tiristores não devem conduzir energia para a rede elétrica, provendo uma espécie de anti-ilhamento para o sistema. Para um segundo fator de proteção, foram colocados dois relés a fim de realizar o desacoplamento dos tiristores com os terminais do inversor quando ocorrer uma situação de queda de energia. Isso foi realizado no projeto entre os *test points* 1 e 3 e entre os *test points* 2 e 4, que podem ser vistos no esquemático da solução completa, na figura 25.

Figura 25 - Solução completa



Fonte: Autoria Própria (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a montagem do circuito houve testes utilizando-se uma lâmpada como carga, ela foi escolhida por ser uma carga que pode ser acionada com a corrente elétrica no sentido horário e anti-horário. Para a visualização dos formatos de onda foi utilizado um osciloscópio.

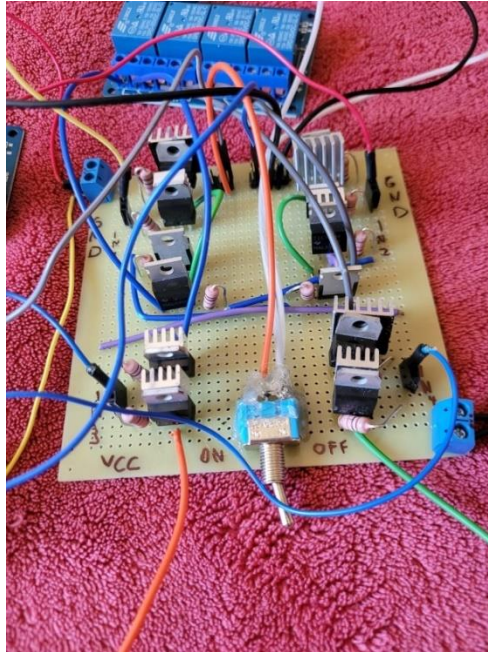
Figura 26 - Lâmpada de 12V (Carga)



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 26 mostra a lâmpada que foi utilizada como carga, seu acionamento é feito com 12V e dissipa 8W de potência, algo que se adequa ao projeto, visto que a tensão de operação arbitrada foi de 12V.

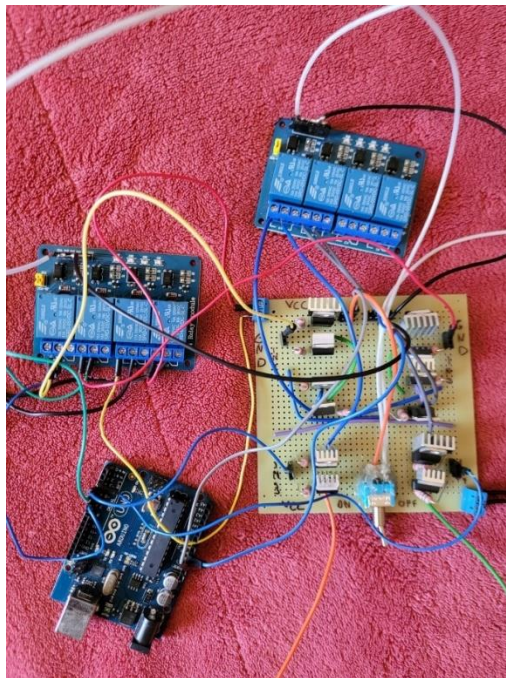
Figura 27 - Circuito completo montado



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 27 mostra o circuito completo da Figura 25 montado, a chave alavanca é usada para realizar as operações de simulação da queda de energia da rede, e os relés são usados para o desacoplamento do inversor para com o resto do circuito.

Figura 28 - Circuito completo montado com relés e microcontrolador



Fonte: Autoria própria (2022).

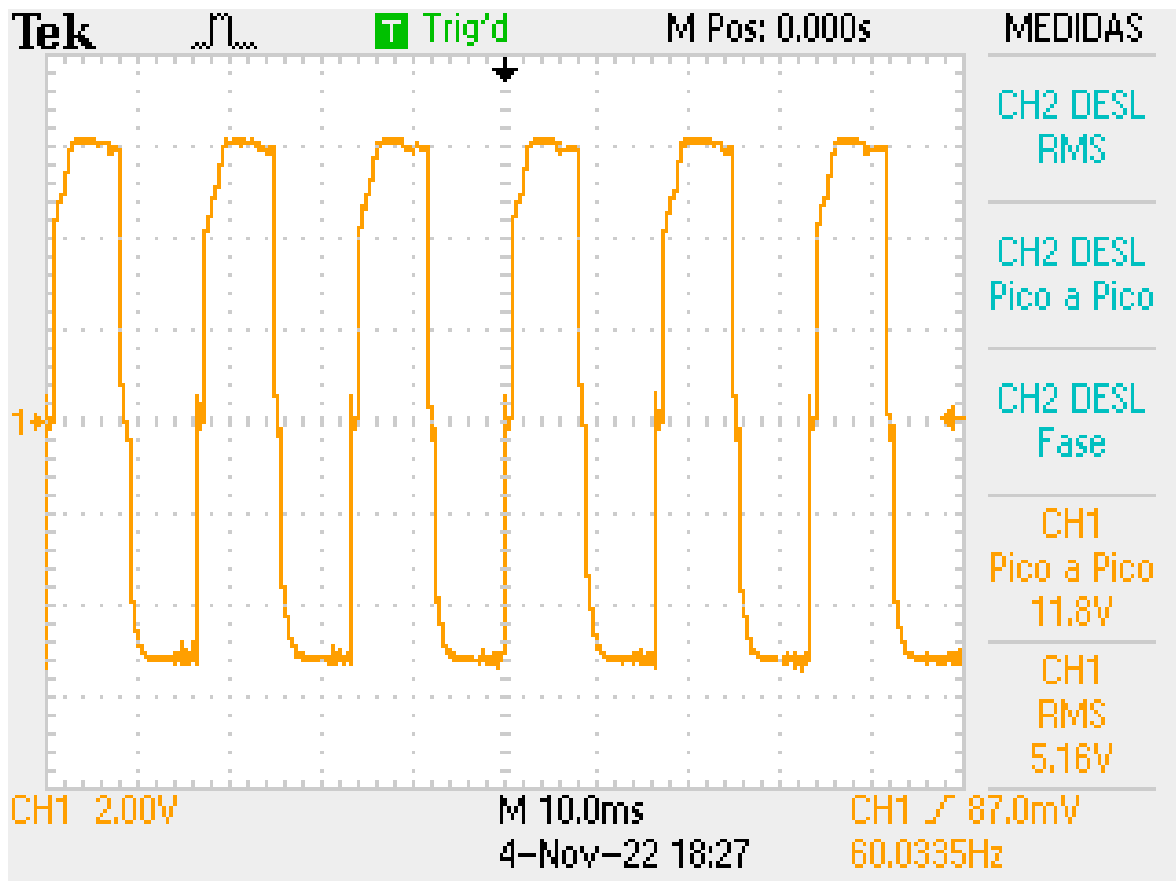
A Figura 28 mostra o sistema completo montado. O microcontrolador Arduino é responsável pelo acionamento dos transistores, tanto no simulador da rede elétrica, como no inversor.

Já as Figura 29 a Figura 33 representam os formatos de onda das quedas de tensão entre os *test points* TP1; TP2; TP3; TP4. Os dois primeiros *test points* representam os terminais da rede elétrica, enquanto os dois últimos representam os terminais da carga e do inversor.

Para simular o *blackout*, foi utilizado um módulo de relés, a fim de cortar a alimentação Vcc e os sinais *Input 1* e *Input 2*.

4.1 Testes sem carga

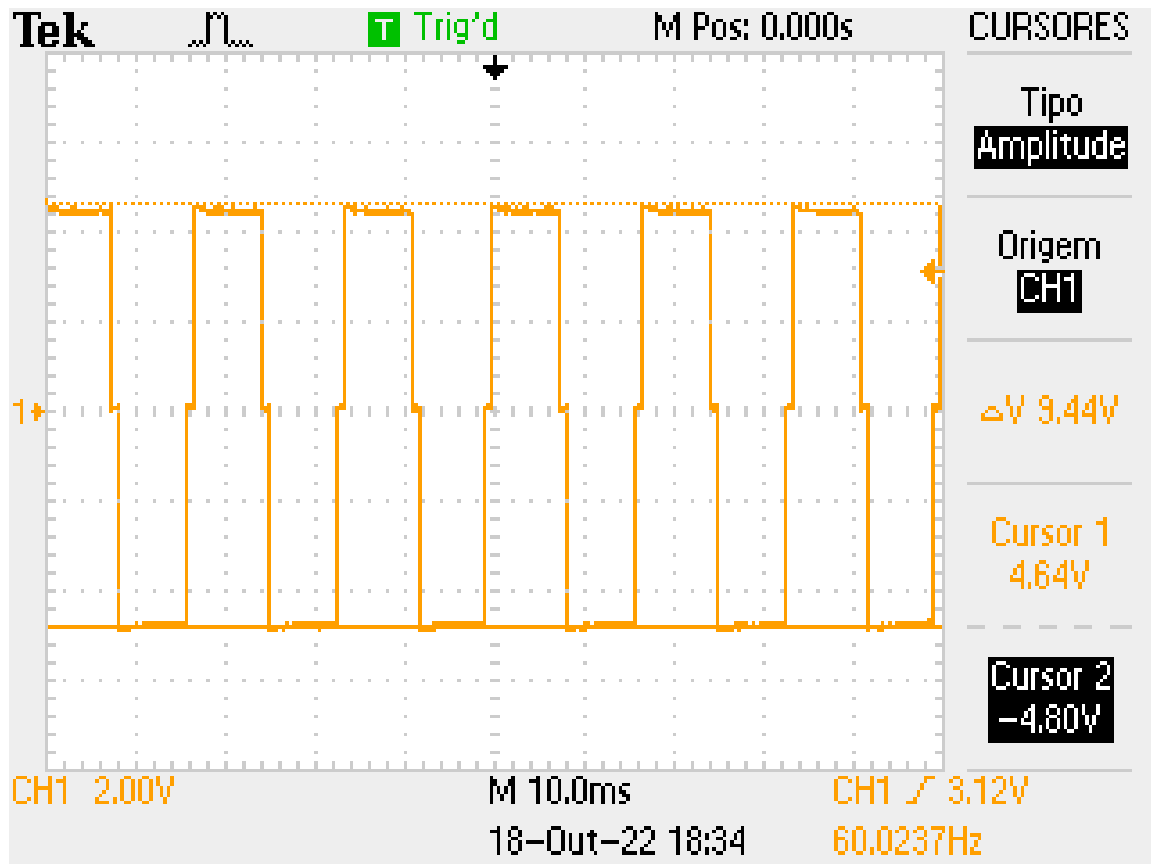
Figura 29 - Formato de onda no inversor (sem carga)



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 29 mostra o formato de onda entre os *test points* 1 e 2, referentes aos terminais do inversor, em uma situação normal de funcionamento e sem carga sendo acionada. Como resultado desse formato de onda, pode-se observar um formato de onda próximo ao quadrado, com um certo *ripple*, fornecendo uma tensão pico-a-pico perto de 12V, a uma frequência de 60Hz.

Figura 30 - Formato de onda na rede elétrica (sem carga)

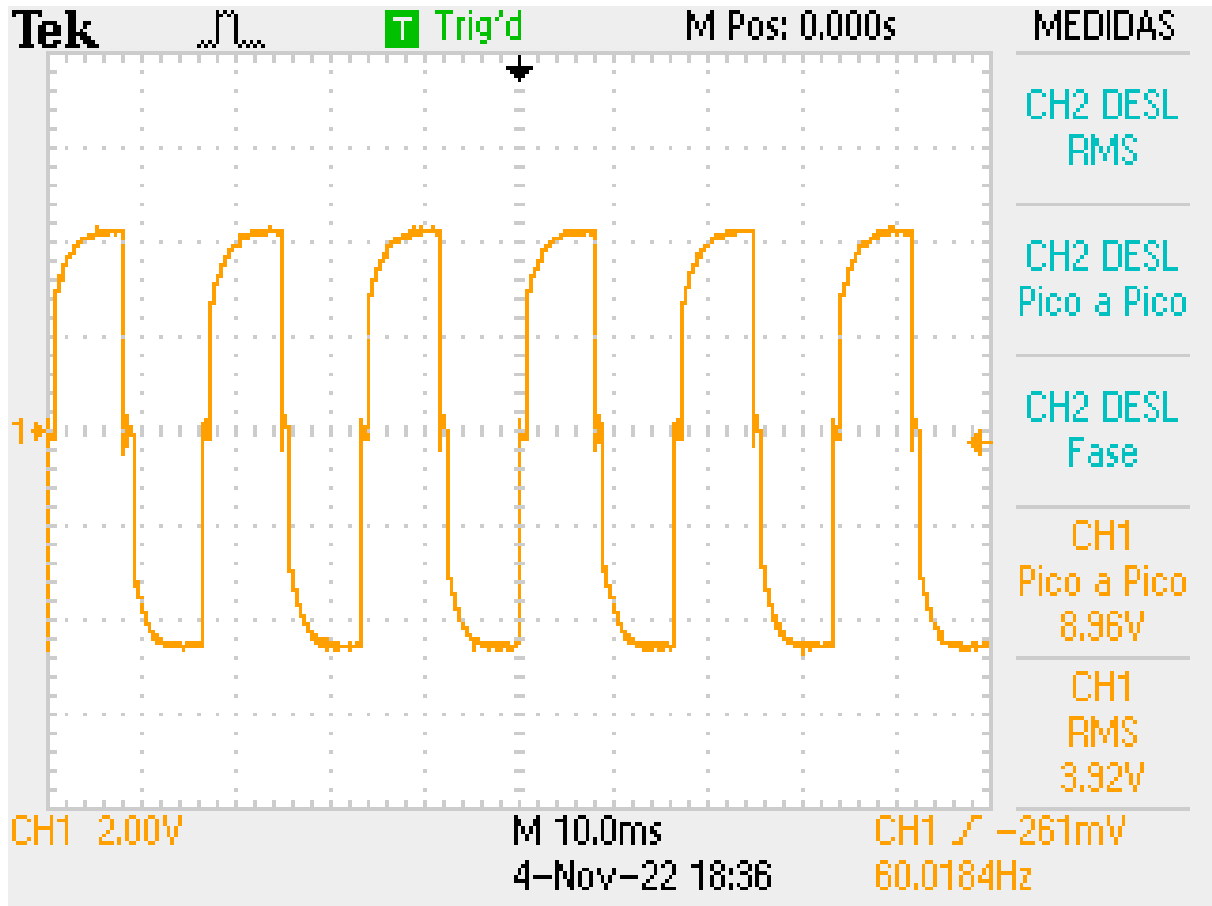


Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 30 mostra o formato de onda entre os *test points* 3 e 4, referentes aos terminais do circuito simulador da rede elétrica, em uma situação normal de funcionamento, porém sem carga sendo acionada. Como resultado desse formato de onda pode-se observar um formato de onda próximo ao quadrado, fornecendo uma tensão pico-a-pico perto de 9,5V, em 60Hz.

4.2 Testes com carga

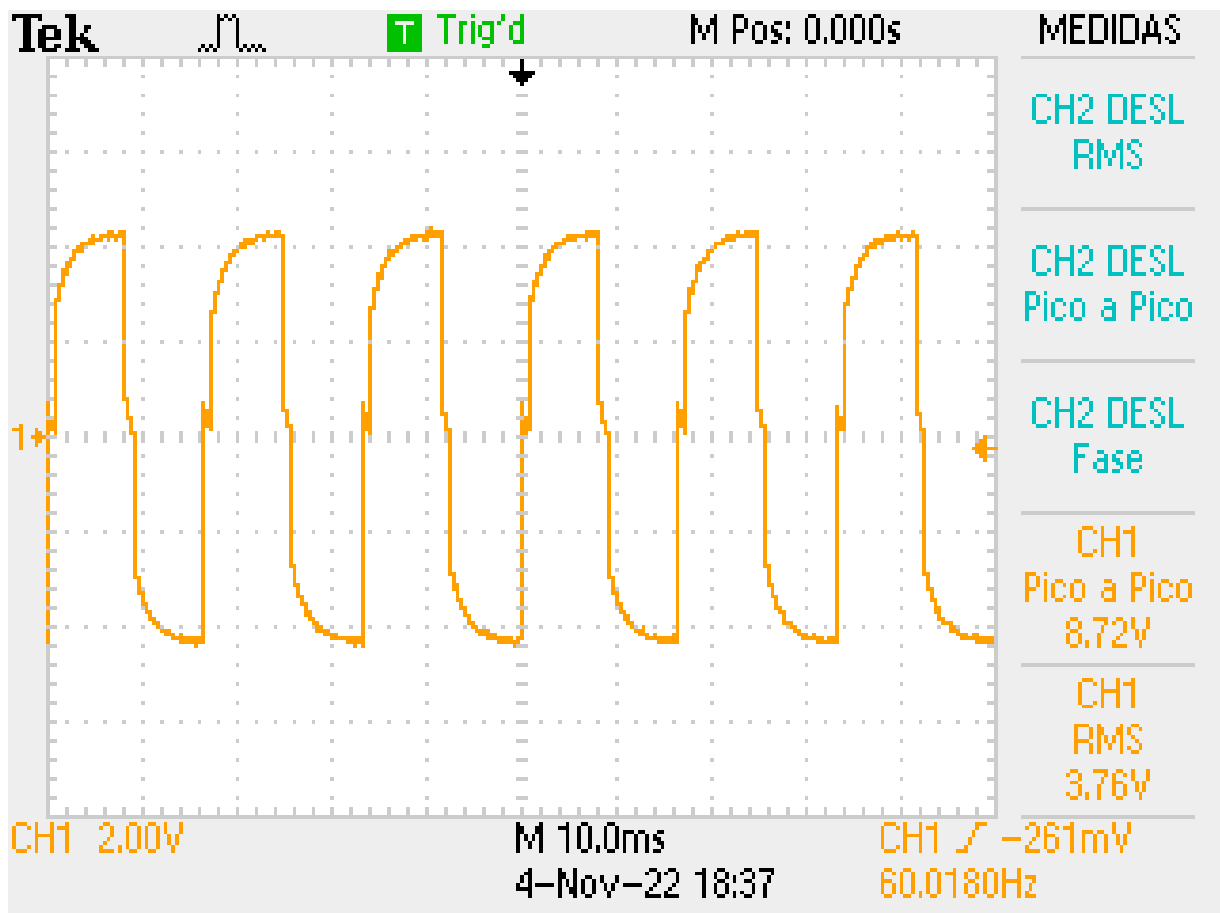
Figura 31 - Formato de onda no inversor (com carga)



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 31 mostra o formato de onda entre os *test points* 1 e 2, referentes aos terminais do inversor, em uma situação normal de funcionamento. Desta forma, porém, com carga sendo acionada, pode-se observar um formato de onda próximo ao quadrado, fornecendo uma tensão pico-a-pico perto de 9V, a uma frequência de 60Hz. Ao analisar a imagem, percebe-se que, comparada à Figura 29, houve uma queda na tensão pico a pico. Isso se deve ao consumo da carga e à potência baixa da fonte, que foi utilizada para a sua alimentação.

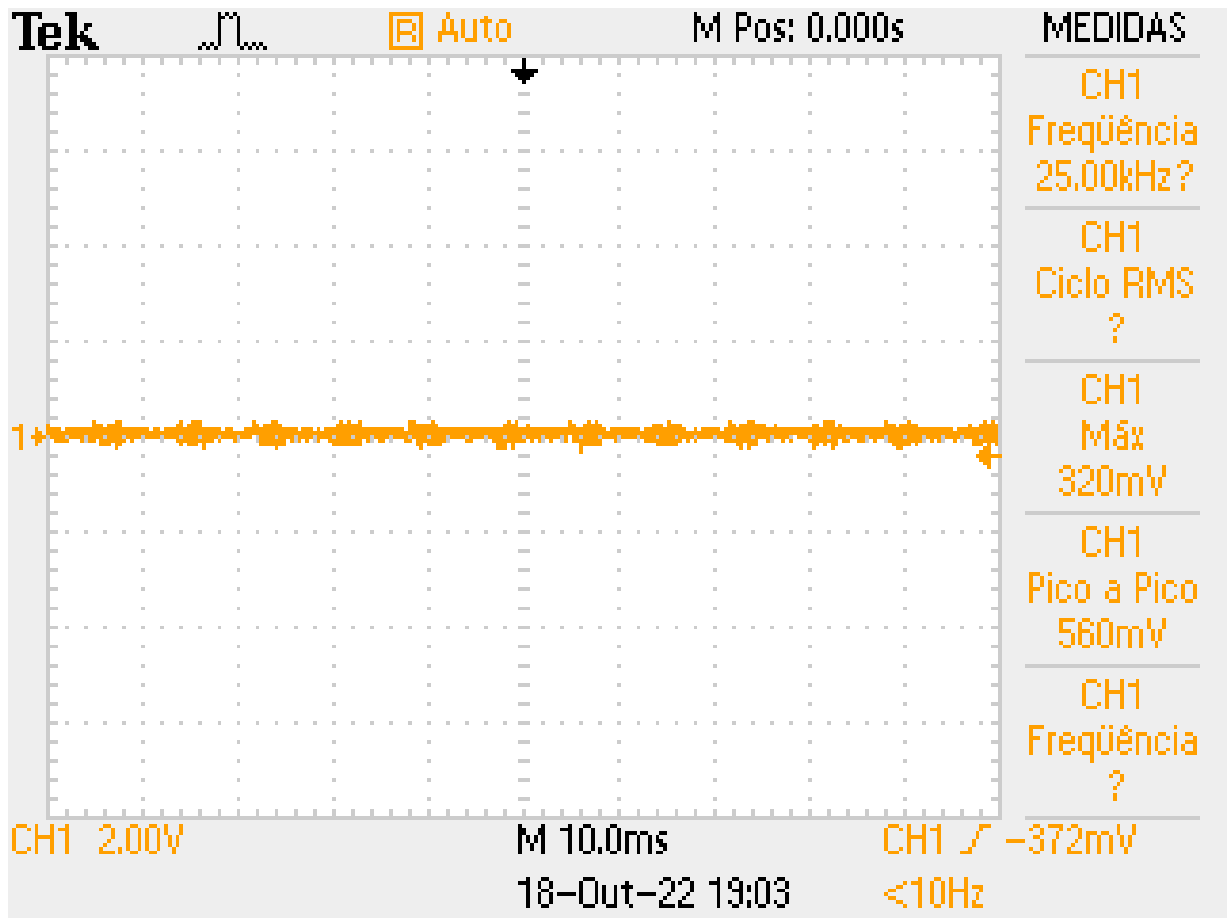
Figura 32 - Formato de onda do inversor em queda da rede (com carga)



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 32 mostra o formato de onda entre os *test points* 1 e 2, referentes aos terminais do inversor, em uma situação de queda de energia, com carga sendo acionada. Como resultado desse formato de onda, pode-se observar certo *ripple*, fornecendo uma tensão pico a pico perto de 9V, a uma frequência de 60Hz. Essa imagem prova que, em uma situação de *blackout*, a carga continua sendo alimentada.

Figura 33 - Formato de onda na rede em queda da rede (com carga)



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 33 mostra o formato de onda nos terminais do circuito simulador da rede, em uma situação de queda de energia, porém com a carga sendo alimentada pelo inversor, mesma situação da Figura 32. Pode se observar que não há tensão aplicada, então pode-se afirmar que o desacoplamento do inversor para com a rede elétrica foi realizado com sucesso.

4.3 Discussão dos resultados

Um ponto a ser discutido analisando os resultados dos testes foi a fonte empregada para a realização dos testes, foram usadas duas fontes de 12V, 1A. Como o circuito demandava mais potência, o acionamento da carga não foi feito de forma adequada, com a potência nominal que a lâmpada exigia, como observado na Figura 31 e na Figura 32. Além disso, foi observado durante os testes, que os transistores de potência estavam esquentando muito, então foram colocados alguns dissipadores nesses componentes, o que ajudou, pois com os dissipadores o sistema aguentou testes mais duradouros. Esse sistema foi feito pensando em uma prova de conceito para um sistema monofásico, mas se fosse pensado para um sistema trifásico o projeto teria que contar com mais 6 transistores, além de que seriam usados mais 2 pinos do microcontrolador. O *firmware*, também, teria que ser alterado, para que os terminais referentes a fase tenham uma defasagem em 120° entre elas.

A Figura 33 mostra que a medição, em uma situação de *blackout* nos terminais de linha, é de apenas ruído, o que implica que o sistema funcionou corretamente. Observou-se, também, uma mudança no formato de onda em situações em que a carga estava sendo acionada. Isso se deve a uma característica capacitiva da lâmpada, isso se percebeu empiricamente, quando a lâmpada acionada demorava algum tempo para ligar. Isso explica um formato de onda mais arredondado do que o esperado, que era uma onda quadrada.

5 CONCLUSÃO

Após a realização e análise dos testes é possível afirmar que os principais objetivos do sistema que são, fornecer energia à unidade consumidora, mesmo em uma situação de *blackout* da rede elétrica e cortar a injeção de energia do sistema próprio de geração para a rede foram cumpridos. Afinal, os terminais da carga continuam sendo alimentados durante uma queda de energia, como pode ser visto na Figura 32. Contudo, os terminais da rede elétrica não possuem tensão, como pode ser observado na Figura 33.

Ou seja, o que se propôs como escopo do projeto e como protótipo de sistema fotovoltaico híbrido foi realizado com sucesso, pois obteve-se a manutenção da alimentação de carga em momentos de queda de energia, mas também os terminais de carga foram isolados dos terminais de fase, acarretando a proteção do operador da companhia de distribuição. Então, os objetivos listados no tópico 1.2 foram alcançados se for levado em consideração o fato do projeto ser uma prova de conceito e que o banco de baterias e a rede foram abstraídos na figura de circuitos que os simulam, os outros objetivos como elaboração de um *firmware*, desenvolvimento de circuitos em ponte H foram alcançados em sua real essência.

Verificou-se que, em medições feitas sem a lâmpada de 12V, ou seja, em circuito aberto, a tensão pico-a-pico entre os terminais da carga era de aproximadamente 10V. Todavia, ao conectar a carga ao sistema, a tensão em seus terminais diminuiu para algo em torno de 5V pico-a-pico. A hipótese que foi levantada para esse problema é que a potência das fontes chaveadas que foram utilizadas (12W) era muito baixa e o circuito demandava mais potência.

5.1 Dificuldades encontradas

Dentre as dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento desse projeto pode-se citar que, pelo fato do sistema fotovoltaico híbrido não ser ainda tão difundido pelos consumidores, não há muita literatura a respeito deste tipo de sistema que serviu como material de apoio.

Inicialmente, o escopo do projeto era montar um minissistema fotovoltaico, operando com um sinal senoidal de frequência de 60Hz e tensão eficaz de 127V, porém devido à complexidade de desenvolvimento de um inversor de frequência, que possui sincronismo com a rede, e ao custo de um painel solar com um banco de baterias, o escopo do projeto teve que ser alterado.

5.2 Trabalhos futuros

Com a realização desta prova de conceito a continuidade natural para esse trabalho seria a sua adaptação para um cenário mais real, utilizando tensão senoidal com frequência de 60Hz e utilizando também um inversor que possuiria sincronismo com a rede elétrica e consequentemente poderia injetar energia nela.

Para esta prova de conceito poderiam ser executados mais testes a fim de verificar a resposta do sistema com cargas indutivas e resistivas, como motores e lâmpadas incandescentes.

Para um caso mais real de uso seria necessária uma melhoria para o caso de uso em uma rede bifásica ou trifásica, afinal essa prova de conceito foi pensada para um sistema fase-neutro monofásico, porém em casos de uso de módulos solares os donos de sistemas fotovoltaicos tendem a usar no mínimo uma rede bifásica. Essa alteração implicaria em um caso mais real de uso, porém aumentaria a dificuldade do projeto.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Resolução normativa nº687/2015**, 2015. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 11 de nov. de 2022.
- ARDUINO. **A000066-datasheet**, 2022. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/static/629b91e120c68128101a49650a92ba77/A000066-datasheet.pdf>>. Acesso em: 1 de dez. de 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 62116**: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistema fotovoltaico conectados à rede elétrica, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2012.
- CALAZANS, Alvaro et al. **Economic analysis of a photovoltaic system connected to the grid in Recife, Brazil**. In: 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE, 2015. p. 1-5
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, CBIC. **Energia solar: brasil ultrapassa 22 GW de potência instalada**, 2022. Disponível em: <<https://cbic.org.br/energia-solar-brasil-ultrapassa-22-gw-de-potencia-instalada>>. Acesso em: 4 de dez. de 2022
- CLIMATE SCIENCE. **Solar power: how to effectively harvest the power of the sun**, Disponível em: <https://climatescience.org/advanced-energy-solar?gclid=CjwKCAjwKmaBhBMEiwAyINuwN6C6x7sUAX3sB7fHAPuVk3bGvhQnvvNuie7y_OX-jO6QU6xRgCXqxoC3zMQAvD_BwE>. Acesso em: 7 de out. de 2022
- DÍAZ-RODRÍGUEZ, Jorge; PABÓN-FERNÁNDEZ, Luis; PARDO-GARCÍA, Aldo. **Sistema híbrido de energía utilizando energía solar y red eléctrica**. Lámpsakos, n. 7, p. 69-77, 2012.
- DINIZ, Antonia Sônia A. Cardoso et al. **Development of a grid-connected photovoltaic-storage**. In: 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE, 2014.
- ECOAQUECEDORES, **Energia solar fotovoltaica off grid**, 2022. Disponível em <<https://www.ecoaquecedores.com.br/energia-solar-fotovoltaica-off-grid/>>. Acesso em 10 de dez. de 2022.
- ELLABBAN, Omar; ABU-RUB, Haitham; BLAABJERG, Frede. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 39, p. 748-764, 2014.
- ELYSIA. **Afinal, qual é o tempo de retorno do investimento em energia solar**, 2022. Disponível em: <<https://elysia.com.br/tempo-retorno-investimento-energia-solar/>>. Acesso em: 2 de dez. de 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Fontes de energia**, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#:~:text=S%C3%A3o%20exemplos%20de%20fontes%20renov%C3%A1veis,das%20mar%C3%A9s%20e%20das%20ondas>>. Acesso em: 19 de set. de 2022.

ENERGYSHOP, **Kit energia solar grid tie 50 kw**, 2022. Disponível em <<https://www.energystore.com.br/kit-energia-solar/energia-solar-empresas/kit-energia-solar-grid-tie-50-0kw>>. Acesso em 10 de dez. de 2022.

FAIRCHILD, **LM741 Datasheet**, 2001. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/53589/FAIRCHILD/LM741.html>>. Acesso em 1 de dez. de 2022.

FREEDOM. **Manual técnico baterias estacionarias**, 2008. Disponível em:<https://www.neosolar.com.br/media/pdf/manuais/Freedom_Baterias_Estacionarias_manual_tecnico_pt.pdf>. Acesso em: 11 de nov. de 2022.

IF-UFRJ, **Aula 8: Transistor como chave**, 2022. Disponível em <<https://www.if.ufrj.br/~toni/analogica8.pdf>>. Acesso em 17 de set. de 2022.

INSTITUTO NEWTON C. BRAGA, **Ponte H completa usando transistores bipolares complementares**, 2020. Disponível em <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica-e-mecatronica/17670-ponte-h-completa-usando-transistores-bipolares-complementares-mec330.html>>. Acesso em 14 de nov. de 2022.

INSTITUTO SOLAR, **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**, 2020. Disponível em: <<https://institutosolar.com/dimensionamento-de-sistemas-fotovoltaicos>>. Acesso em: 17 de set. de 2022.

MARTINS, Fernando Ramos et al. **Atlas brasileiro de energia solar 2**. 2017.

MOURA. **Saiba o que é uma bateria estacionária e como ela funciona**, 2019. Disponível em: <<https://www.moura.com.br/blog/o-que-e-bateria-estacionaria/>>. Acesso em: 2 de dez. de 2022.

MPPTSOLAR, **Ligações de baterias em série e paralelo**, 2022. Disponível em <<https://www.mpptsolar.com/pt/baterias-serie-paralelo.html>>. Acesso em 10 de dez. de 2022.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, NREL, **Best research cell efficiencies, crystalline silicon cells**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies-rev220630.pdf>>. Acesso em: 7 de out. de 2022

OMAR, Moien A.; MAHMOUD, Marwan M. Design and simulation of a PV system operating in grid-connected and stand-alone modes for areas of daily grid blackouts. **International Journal of Photoenergy**, v. 2019, 2019.

PENG P., LIANG S., GUOQIN Y., XIAODONG L., YUYING S. and JIAJUN S., "Economic comparison of distributed grid-connected photovoltaic generation with different business models," **2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)**, 2016, pp. 585-588

REITER, Renê Alfonso; DE OLIVEIRA REITER, Renan Diego; PÉRES, Adriano. Controlador de carga de acordo com a portaria 396 do INMETRO. **Seminário de Eletrônica de Potência e Controle (SEPOC 2014)**, v. 1, 2014.

ROCHA, Maria Alexandra Maia. **Tecnologias de Geração de Energia Solar**. 2015.

SREEDEVI, J.; ASHWIN, N.; RAJU, M. Naini. A study on grid connected PV system. In: **2016 National Power Systems Conference (NPSC)**. IEEE, 2016. p. 1-6.

TEXAS INSTRUMENTS, **Getting started with TINA-TI**, 2008. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/pdf/sbou052>>. Acesso em: 1 de dez. de 2022.

TIEPOLO, Gerson Máximo et al. Atlas de energia solar do estado do paraná-resultados. **Revista Brasileira de Energia Solar**, 2018.

WEG, **Transformador de distribuição pequeno (até 300 kVA)**, 2022. Disponível em <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/30-a-300-kVA/Transformador-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-Pequeno-%28at%C3%A9-300-kVA%29/p/MKT_WTD_SMALL_DISTRIBUTION_TRANSFORMERS_UP_TO_300KVA>. Acesso em: 11 de dez. de 2022.

APÊNDICE

APÊNDICE A – FIRMWARE

```

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#define F_CPU 16000000UL
int modo = 0;

ISR (TIMER1_OVF_vect)
{
    if(0==modo)
    {
        PORTD = 0b00101000;
        TCNT1 = 65419;
        modo =1;
    }
    else if(1==modo)
    {
        PORTD = 0b00000000;
        TCNT1 = 65523;
        modo =2;
    }
    else if(2==modo)
    {
        PORTD = 0b00010100;
        TCNT1 = 65419;
        modo =3;
    }
    else if(3==modo)
    {
        PORTD = 0b00000000;
        TCNT1 = 65523;
        modo =0;
    }
}

int main()
{
    DDRD |= 0b00111100;
    TCNT1 = 49911;

    TCCR1A = 0x00;
    TCCR1B = (1<<CS10) | (1<<CS12);
    TIMSK1 = (1 << TOIE1) ;
    sei();

    while(1)
    {
    }
}

```