



ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL FREDERICO GUILHERME SCHMIDT

CURSO TÉCNICO EM ELETROTÉCNICA

AMANDA DE BRITO RECH
CLAUDIOMIRO DA SILVA MEIRA JÚNIOR
HENRIQUE DE JESUS ACOSTA

S.F.S.C.I.C.C.

SISTEMA FOTOVOLTAICO DE SUSTENTAÇÃO DE CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO
EM CORRENTE CONTÍNUA

SÃO LEOPOLDO

2019

AMANDA DE BRITO RECH
CLAUDIOMIRO DA SILVA MEIRA JÚNIOR
HENRIQUE DE JESUS ACOSTA

S.F.S.C.I.C.C.
SISTEMA FOTOVOLTAICO DE SUSTENTAÇÃO DE CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO
EM CORRENTE CONTÍNUA

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Eletrotécnica da Escola Técnica Estadual Frederico Guilherme Schmidt como requisito para aprovação nas disciplinas do curso sob orientação do Prof. Deny Halison Pontin e coorientação da Prof^a. Dra. Carla Adriana da Silva Barbosa.

SÃO LEOPOLDO

2019

RESUMO

A Crise energética é um termo que está em evidência em todo o mundo. Uma vez que a matriz energética mundial é composta em grande parte por fontes não renováveis, torna-se vital o desenvolvimento de meios renováveis para substituição da matriz energética “suja”. No âmbito nacional, é cada vez mais notório que o país necessita diversificar a sua matriz, principalmente quando se pensa em geração de energia elétrica. O sistema de geração tem como pilar as hidroelétricas, estas dependem de chuvas para manter os reservatórios em níveis adequados, tornando-o muito sensível, devido ao rápido avanço das mudanças climáticas. A partir dessa análise, propõe-se o estudo do uso de células fotovoltaicas, que convertem a energia solar em elétrica, como uma alternativa na diversificação da matriz energética. O estudo concentra seu esforço no uso de tal energia para alimentar a iluminação de um ambiente com uma demanda considerável de iluminação, verificando se é possível torna-lo autossuficiente. O estudo empregou métodos de pesquisa bibliográfica e documental para levantamento de dados. Para melhor desenvolvimento do trabalho, ele foi dividido em módulos de pesquisa, onde cada módulo possui um objetivo a ser atingido e, para desenvolvimento do módulo seguinte, é necessário que o módulo anterior esteja pronto, com seu objetivo alcançado. Tendo como alicerce a urgência do desenvolvimento de tecnologias que resultem em um impacto ínfimo ao meio ambiente e, com isso, ajude a combater a emergência climática global, a pesquisa foi norteadada visando a redução de custos e o aumento de eficiência dos módulos fotovoltaicos, tornando possível sua aplicação em larga escala.

Palavras-Chave: Energia Fotovoltaica; Energia Renovável; Painéis Solares.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 TEMA E SUA DELIMITAÇÃO.....	8
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	8
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.1 Objetivo Geral	8
1.3.2 Objetivos Específicos	8
1.4 JUSTIFICATIVA.....	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 BREVE HISTÓRIA GERAL.....	10
2.2 ENERGIA SOLAR.....	15
2.3 O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	16
2.4 A ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA.....	19
2.5 CÉLULA DE SILÍCIO MONOCRISTALINO.....	20
2.6 CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINO.....	21
2.7 CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO.....	21
2.8 O PAINÉL FOTOVOLTAICO.....	21
3. METODOLOGIA	23
4. CRONOGRAMA	28
5. RESULTADOS ESPERADOS	29
6. REFERÊNCIAS	30

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Produção de energia elétrica mundial por recurso.....	06
Figura 2: Experimento de Bacquerel.....	09
Figura 3: Princípio do Efeito Fotoelétrico.....	10
Figura 4: apresentação da primeira célula fotovoltaica.....	12
Figura 5: Princípio Fotovoltaico em uma célula.....	16

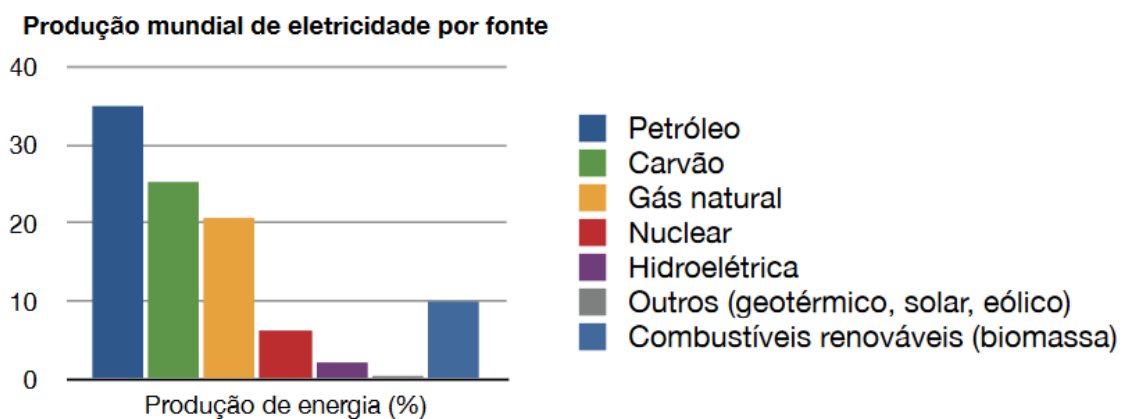
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPG	Energia Potencial Gravitacional
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
GHE	<i>Glass House Effect</i>
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
C.C.	Corrente Contínua

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, 87% da matriz energética mundial é composta por fontes não renováveis, sendo destes 87%, 33% do petróleo, 30% do carvão e 24% do gás natural. Por serem fontes não renováveis, elas se esgotarão em algum momento e, dado o consumo anual, estima-se que isto poderá acontecer antes do fim do atual século. Sendo a energia solar fotovoltaica uma fonte de energia renovável, ela pode ser uma saída para o fim do uso das energias não renováveis, porém, sua eficiência na produção de energia elétrica é inferior as energias não renováveis, além de ter um custo muito alto de instalação em larga escala, tornando seu custo-benefício inviável para a substituição da matriz energética mundial atualmente. Posto isso, achar uma maneira de tornar a produção de energia fotovoltaica mais eficiente e de menor custo de implementação, significará uma melhora no seu custo-benefício, tornando-a competitiva para a redução da dependência de energias não renováveis na matriz energética mundial, colaborando, principalmente, para evitar o colapso do sistema energético mundial, além de auxiliar na contenção do aquecimento global, ocasionado pelos gases de efeito estufa emitidos pelas fontes não renováveis. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

Figura 1: Produção de energia elétrica por recurso



Fonte: International Energy Agency, 2019.

1.1 TEMA E SUA DELIMITAÇÃO

Sistema fotovoltaico de sustentação de um circuito de iluminação em corrente contínua.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Como desenvolver um sistema de alimentação fotovoltaica, mais eficiente e de menor custo, para aplicação em um circuito de iluminação residencial em Corrente Contínua?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica mais eficiente e de baixo custo capaz de alimentar um circuito de iluminação residencial em CC.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica equilibrando o custo reduzido de manutenção, instalação e operação com uma boa eficiência.
- Integrar o sistema desenvolvido a um circuito de iluminação residencial em CC.

1.4 JUSTIFICATIVA

Ano após ano, a humanidade testemunha eventos climáticos de proporções catastróficas e, ano após ano, com maior intensidade, o que levanta a dúvida, “O que está causando isso?”.

Apesar das mudanças climáticas já serem conhecidas há bastante tempo, com o registro geológico acusando diversas mudanças climáticas no passado longínquo da terra e o registro histórico mostrando mudanças ocorridas em diversos períodos da evolução humana, apenas no final da década de 1980 que diversos governos decidiram instaurar um organismo internacional para investigar as mudanças climáticas nos dias de hoje. Denominado

Intergovernmental Panel on Climate Change, o IPCC tem por objetivo encontrar a resposta da pergunta referente às mudanças climáticas. (IPCC, 2019).

Após alguns anos de investigações, o IPCC encontrou uma resposta, é a humanidade que está causando as mudanças climáticas, através da emissão de quantidades alarmantes dos gases de efeito estufa que, uma vez na atmosfera, retêm por mais tempo o calor gerado pela radiação eletromagnética emitida pelo sol que incide no planeta Terra, gerando o efeito de aquecimento global, também conhecido como GHE, *Glass House Effect*. Com a temperatura global elevada, há um desequilíbrio no ecossistema geral do planeta, uma vez que zonas mais amenas tornam-se mais quentes e zonas já quentes aumentam mais ainda sua média de temperatura, gerando eventos climáticos de maior intensidade e com grandes poderes destrutivos. (IPCC, 2019).

Diante dessa realidade, torna-se vital a redução da emissão de gases de efeito estufa. Sendo a principal fonte de emissão a matriz energética mundial, composta de 87% de fontes geradoras de gases de efeito estufa, o desenvolvimento de fontes alternativas para a substituição da matriz energética justifica a presente pesquisa. Uma vez que a energia solar fotovoltaica não possui a emissão de gases de efeito estufa em nenhum de seus processos, sua utilização torna-se plausível e necessária para a solução, ou auxílio da solução, sobre a questão das mudanças climáticas ocasionadas pelo aquecimento global. (IPCC, 2019).

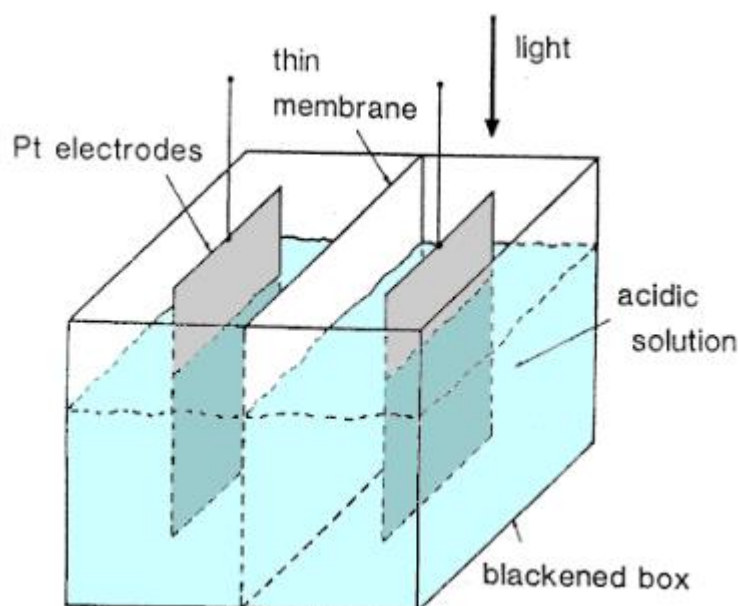
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BREVE HISTÓRIA GERAL

A ideia de produzir energia elétrica através da luz solar não é algo recente, com seu conceito base remontando ao século XIX, tendo por princípio os experimentos do físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891). (BUHLER, 2016)

Aos 19 anos, Becquerel dedicava-se a diversos estudos, como sobre o espectro solar, magnetismo, eletricidade e, com seus estudos sobre luminescência e fosforescência, acabou por descobrir o Efeito Fotovoltaico em 1832. O experimento de Becquerel que culminou na descoberta do princípio fotovoltaico consistiu em verificar que, ao mergulhar duas placas de latão em um recipiente contendo uma solução ácida a base de cloreto de prata e expor-lhe ao sol, gerava-se uma corrente elétrica. A ilustração abaixo demonstra como ocorreu a montagem do experimento. (BUHLER, 2016).

Figura 2: Experimento de Becquerel

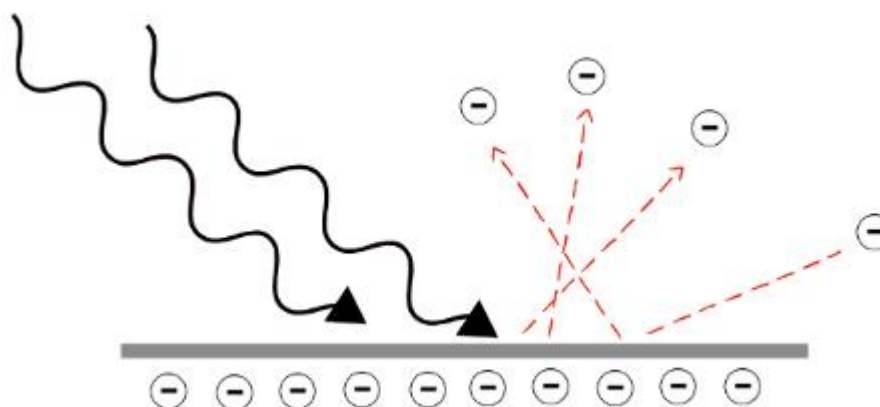


Fonte: Buhler, 2016.

Inicialmente, a descoberta de Becquerel confundiu-se com o Efeito Fotoelétrico, descoberto anos depois pelo físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894), em 1887. Ocorreu-se da seguinte forma. Becquerel divulgou suas descobertas sobre o efeito fotovoltaico, porém, sem explicar o que o causava, então, quando Hertz realizava estudos sobre a natureza eletromagnética da luz, acabou por descobrir o efeito fotoelétrico e, por ser similar ao que foi

descrito por Becquerel em 1832, entrou-se em consenso chamar ambos os fenômenos de Efeito Fotoelétrico. O nome Fotoelétrico suprimiu o nome fotovoltaico devido ao fato de que o estudo realizado por Hertz ter atingido maior público. A imagem abaixo demonstra o que foi descoberto por Hertz. (BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2018).

Figura 3: Princípio do Efeito Fotoelétrico



Fonte: Helerbrock, 2019.

Hertz, durante seus estudos, notou que ao expor duas chapas metálicas a alguma fonte de luz, faíscas saíam da superfície do metal, efeito que denominou Fotoelétrico. Porém, ao mesmo modo que o Efeito Fotovoltaico, desconhecia-se o que o ocasionava, com a explicação surgindo 18 anos após a divulgação das descobertas de Hertz. (BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2018).

A diferenciação entre os dois efeitos veio com os estudos sobre a dualidade Partícula-Onda, realizadas pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955). Baseando-se nos estudos de outro físico alemão, Max Planck (1858-1947), Einstein criou um novo modelo para explicar a luz, baseado na quantização das ondas eletromagnéticas. Assim, Einstein propôs que, além de ondas eletromagnéticas, a luz é constituída por partículas denominadas fótons, e seria o choque dos fótons com os elétrons, primeira partícula subatômica descoberta em 1897, pelo físico britânico Joseph John Thomson, que ocasionava o efeito descoberto por Hertz. Tal explicação aplica-se ao efeito fotovoltaico, descoberto por Becquerel. (BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2019).

Esclarecido o que ocasionava esses efeitos observados em laboratório, diversos estudos explorando o potencial do Efeito Fotovoltaico começaram a ganhar força. Ainda no século XIX, o pesquisador britânico Willian Grylls Adams registrou o Efeito Fotovoltaico em

um semicondutor, observação tal que abriu caminho para o surgimento das células fotovoltaicas. (PIEDADE, 2017).

Em 1930, já com o crescente aumento de pesquisas sobre semicondutores, o físico alemão Walter Schottky estabelece a Teoria Fotovoltaica, elaborando a seguinte fórmula:

$$E_{int}(x) = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x}$$

Tal fórmula é a base para o cálculo da energia de interação entre uma partícula pontual, a uma distância “ x ”, e uma superfície metálica plana. Tal interação também é chamada de “energia potencial de imagem”, na sigla PE. (PIEDADE, 2017)

O PE apresentado por Schottky passou a ser componente padrão em modelos sobre a barreira ao movimento, $M(x)$, experimentada por um elétron aproximando-se de uma superfície metálica ou a interface metálica de um semicondutor. A barreira de movimento, $M(x)$, está presente na equação de onda de Schrodinger, sendo:

$$\frac{d^2}{dx^2}\Psi(x) = \frac{2m}{\hbar^2}M(x)\Psi(x).$$

Sendo o \hbar a constante de Planck dividida por 2π (PIEDADE, 2017).

Combinando a PE com termos relativos a um campo elétrico aplicado F e a uma altura h (na ausência de campo), chega-se na formulação da dependência de energia da barreira na distância x , sendo a medida da “superfície elétrica” no semicondutor:

$$M(x) = h - eFx - e^2/4\pi\epsilon_0\epsilon_r x .$$

Onde e é a carga positiva regular, ϵ_0 é a constante elétrica e o ϵ_r é a permissividade relativa do meio (=1 no vácuo). Em um semicondutor, tal barreira é chamada de Barreira de Schottky, base para as teorias de Emissão Termiônica e de Emissão de Elétrons de Campo. Aplicando-se o campo, a barreira diminui, aumentando a Emissão Termiônica. (PIEDADE, 2017).

Tais fundamentos são a base para a fabricação das células fotovoltaicas, uma vez que, sendo constituídas por semicondutores, a transferência de elétrons entre o semicondutor e o metal na junção se dá pela transposição das Barreiras de Schottky. As formulas apresentadas acima explicam o que ocorre na junção P-N, base de funcionamento de um painel solar fotovoltaico.

No dia 25 de abril de 1954, os executivos da *Bell Labs*, anunciaram ao mundo a primeira célula fotovoltaica funcional e comercial. Denominada “*Bell Solar Battery*”, o

equipamento era capaz de fornecer carga para um aparelho de rádio. A época, o jornal *The New York Times*, publicava em sua primeira página o invento da *Bell Labs*, escrevendo: “O início de uma nova era, possivelmente a realização de um dos sonhos mais desejados da humanidade – o aproveitamento da energia quase ilimitada do sol para uso da civilização”. (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Figura 4: Apresentação da primeira célula fotovoltaica



Créditos: *Bell Labs* 1954

Essa célula fotovoltaica surgiu já na década de 1940, pelas mãos de Russel Shoemaker Ohl, pesquisador na área de semicondutores da *Bell Labs*. Quando analisava algumas amostras de silício, notou que em uma amostra, que possuía uma rachadura, uma corrente elétrica fluía quando exposta a luz. Ohl descobriu que esta rachadura marcou o limite entre regiões contendo diferentes níveis de impurezas, de modo que um lado do fragmento ficava positivamente carregado e outro ficava negativamente carregado, com a rachadura servindo de barreira para a troca de elétrons. Porém, o excesso de cargas positivas de um lado e de cargas negativas do outro acaba por criar um Campo Elétrico e, quando conectado à um circuito, o fóton de entrada acabava por “jogar” o elétron para a região positivamente carregada. Com isso, Ohl descobriu que o nível de impurezas do silício está ligado ao surgimento do Efeito Fotovoltaico. (BELL LABS, 2019).

Treze anos após a descoberta de Ohl, três pesquisadores da *Bell Labs* acabaram por utilizar a descoberta na fabricação da primeira célula fotovoltaica comercial e funcional do mundo. (BELL LABS, 2019).

O engenheiro Daryl Chapin trabalhava na pesquisa de fontes alternativas de energia para sistemas de telefonia localizados em zonas remotas úmidas. Com as baterias convencionais da época degradando-se rapidamente nesses ambientes, Chapin decidiu por utilizar a energia solar para abastecimento elétrico para esses sistemas, porém, inicialmente optou por células feitas a base de selênio, as quais não obtiveram grandes resultados. (BELL LABS).

Outros pesquisadores da *Bell Labs*, o químico Calvin Fuller e o físico Gerald Pearson, trabalhavam no controle de semicondutores, introduzindo impurezas. Em laboratório, Fuller e Pearson mergulharam em uma solução de lítio uma amostra de silício contendo impurezas de gálio, ligaram a amostra em um amperímetro e incidiram luz sobre o experimento, o amperímetro acusou a presença de uma corrente elétrica suficiente para manter uma carga como um sistema telefônico ou um aparelho de rádio. Ao divulgarem suas descobertas, Chapin juntou-se a dupla e passaram a desenvolver a célula fotovoltaica anunciada em 1954. Diversos problemas foram encontrados durante o desenvolvimento, principalmente referente as impurezas utilizadas, sendo a célula final utilizando silício contendo impurezas de boro e arsênio. (BELL LABS, 2019).

Este feito marcou o início da era comercial da energia solar fotovoltaica. A partir deste ponto, iniciou-se uma corrida entre empresas do ramo para desenvolvimento de células fotovoltaicas mais eficientes e de menores custos, a fim de aumentar suas aplicabilidades. (BELL LABS, 2019).

O surgimento desta célula coincidiu-se também com o início da Guerra Fria e da Corrida espacial, onde governos passaram a incentivar e subsidiar pesquisas na área a fim de utiliza-las em seus programas espaciais. O que ocasionou uma grande proliferação de pesquisas visando à aplicação da Energia Solar Fotovoltaicas para abastecimento de energia elétrica de satélites e veículos espaciais. (BELL LABS, 2019)

No decorrer das décadas seguintes, outros fatores impulsionaram as pesquisas na área de energia solar, sendo o embargo comercial a venda de petróleo, pelos países da OPEP, na década de 1970 um grande marco, pois, evidenciou-se para o mundo a dependência generalizada de combustíveis de origem fóssil. Sendo assim, o desenvolvimento de fontes alternativas para geração de energia elétrica deixou de ser um fator político/militar, no âmbito da Guerra Fria, e tornou-se uma questão de sobrevivência da humanidade, uma vez que mais de 80% da matriz energética mundial é constituída por fontes não renováveis, o que impõem uma data limite para sua utilização. (DIENSTMAN, 2009).

2.2 ENERGIA SOLAR

Atualmente, trata-se de uma questão de sobrevivência o desenvolvimento de meios eficazes de produção de energias limpas, como é o caso da Energia Solar Fotovoltaica.

O termo “energia solar” é comumente utilizado como sinônimo de “energia solar fotovoltaica”. Ao questionar uma pessoa sobre o que é energia solar, a primeira imagem que vem a mente é a de painéis solares fotovoltaicos, utilizados para a geração de energia elétrica. (ANEEL, 2019).

Porém, o termo energia solar é muito abrangente, com suas ramificações estendendo-se por diversas áreas, como matrizes energéticas.

Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2019).

No Brasil, além da abundante utilização de hidroelétricas (forma indireta de energia solar), há uma grande utilização de energia solar de forma direta, sendo energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica. A energia hidráulica é uma energia solar indireta porque aproveita a energia potencial gravitacional da água para girar uma turbina e, para gerar a EPG, o sol evaporou a água e a fez chover em uma região mais elevada, permitindo criar um desnível para a instalação de hidroelétricas. A energia solar de maneira direta, como a energia solar térmica e fotovoltaica, aproveitam diretamente a radiação eletromagnética emitida pelo sol. (ANEEL, 2019).

Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, o primeiro é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido a características climáticas, e o segundo, nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica (ANEEL, 2019).

Isto posto, pode-se notar que o Brasil possui um grande potencial de utilização de energia solar, em suas mais diversas formas, buscando a melhor opção para cada região e para atender as necessidades encontradas. Isso se dá ao fato do tamanho continental do território brasileiro, onde a região nordeste conta com maior incidência de luz solar para a geração de

energia elétrica e a região sul conta com um clima mais ameno, permitindo a utilização da energia solar térmica para o aquecimento da água. (ANEEL, 2019).

2.3 O EFEITO FOTOVOLTAICO

Para melhor compreensão do efeito fotovoltaico, primeiro deve-se entender o conceito básico sobre materiais condutores, isolantes e semicondutores, além de suas diferenciações.

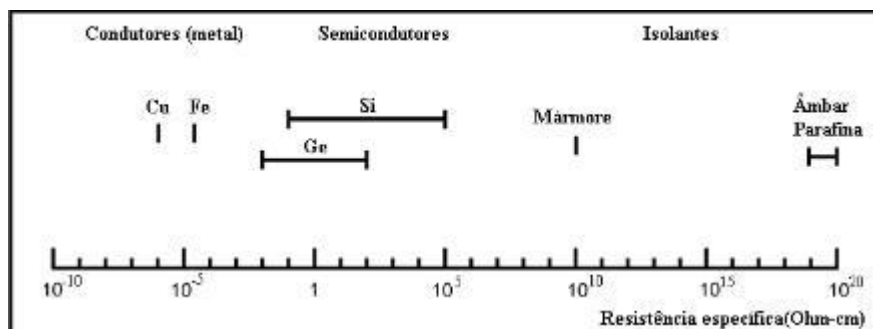
Materiais condutores são compostos por átomos que possuem poucos elétrons em sua camada de valência, o que lhes proporcionam grande quantidade de elétrons livres. Em bons materiais condutores, os átomos constituintes possuem apenas um elétron em sua camada de valência. A alta condutividade se dá pela fraca ligação entre o elétron na camada de valência e o núcleo do átomo, de forma que, à temperatura ambiente, a energia térmica é suficiente para arrancá-lo de sua órbita de valência, tornando-o um elétron livre. (SENAI DR-BA, 2019).

Nos metais, o número de elétrons livres é quantitativamente elevado, fazendo com que eles se comportem como condutores ideais.

Caso um material condutor seja submetido a uma diferença de potencial, seus elétrons livres passam a se locomover de forma ordenada. Os elétrons, de carga negativa, são atraídos para o polo positivo e quando um elétron muda de posição, o lugar deixado é rapidamente substituído por outro elétron, estabelecendo uma corrente elétrica. (SENAI DR-BA, 2019).

Quanto maior o fluxo da corrente elétrica pelo material condutor, quando submetido a uma diferença de potencial, maior será sua condutividade. A ação da temperatura sobre a condutividade é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior for a temperatura aplicada ao condutor, mais energia estará sendo fornecida ao mesmo, resultando em maiores quantidades de choques entre elétrons e um movimento desordenado no condutor, dificultando, por conseguinte, o movimento dos elétrons e o fluxo da corrente elétrica. (SENAI DR-BA, 2019).

Materiais isolantes, por sua vez, são compostos por átomos que possuem em sua camada de valência muitos elétrons. Os elétrons, nos materiais isolantes, acham-se fortemente presos em suas ligações com o núcleo do átomo e, mesmo quando materiais isolantes são aquecidos, os elétrons desprendem-se em quantidades muito pequenas, o que impede a circulação de elétrons livre, o surgimento de uma corrente elétrica. A tabela abaixo apresenta graficamente os materiais com base em sua condutividade elétrica. (SENAI DR-BA, 2019).

Tabela 1: Classificação dos materiais pela condutividade elétrica

Fonte: SENAI DR – BA

O material semicondutor, por sua vez, é considerado um material intermediário entre materiais condutores e isolantes. São formados por átomos tetravalentes, ou seja, possuem quatro elétrons em sua camada de valência, que agrupam-se entre si, formando uma estrutura cristalina, sendo assim, são substâncias cujos átomos se posicionam no espaço formando uma estrutura ordenada. Nessa estrutura, cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, por meio de ligações covalentes, sendo assim, cada um dos quatro elétrons na camada de valência é compartilhado com um átomo vizinho. (SENAI DR-BA, 2019).

Os semicondutores tiveram papel fundamental no avanço da eletrônica. Os principais semicondutores utilizados são o germânio (Ge) e o silício (Si), que, em estado puro, apresentam-se sob a forma cristalina, significando que seus átomos acham-se dispostos uniformemente em uma configuração periódica. (SENAI DR-BA, 2019).

Nos semicondutores, se um elétron da camada de valência receber energia externa, como luz e calor, e esta for maior que a força de atração exercida pelo núcleo, o elétron pode “subir” para uma órbita acima da camada de valência, chamada de banda de condução. Uma vez na banda de condução, o elétron está livre para se deslocar pelo material semicondutor, sendo o mesmo chamado de elétron livre. Ao ir para a banda de condução, o elétron deixa um vazio, chamado de lacuna. Este fenômeno é chamado de quebra de ligação covalente, o qual produz um par elétron-lacuna. Do mesmo modo, um elétron livre vagando pelo material semicondutor pode passar perto de uma lacuna e ser atraído pela mesma, neste caso, há uma recomposição. (SENAI DR-BA, 2019).

Quanto ao movimento dos elétrons e lacunas, haverá sempre a possibilidade de ambos se recombinarem, eliminando, dessa maneira, dois portadores móveis, um elétron e uma lacuna. Desta forma, não há conservação de lacunas e elétrons livres de maneira indefinida. (SENAI DR-BA, 2019).

As propriedades elétricas dos semicondutores são afetadas por variação de temperatura, exposição à luz e acréscimos de impurezas. A temperatura exerce influência direta sobre o comportamento dos materiais semicondutores, no que diz respeito à condutibilidade elétrica. À medida que a temperatura do semicondutor aumenta, sua resistividade diminui ao contrário da resistividade de um condutor normal que obedece a Segunda Lei de Ohm. (SENAI DR-BA, 2019).

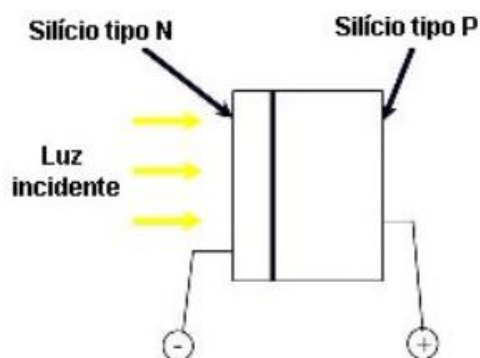
Para melhor exemplificação, o silício é um isolante perfeito quando a 0 K, $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, isso se deve ao fato da não existência de elétrons livres a essa temperatura. À medida que a temperatura aumenta, começa a ocorrer a quebra das ligações covalentes, iniciando o processo de recombinações. À temperatura de 25°C , um cristal de silício puro possui uma quantidade estável de pares elétron-lacuna, devido as constantes quebras de ligações covalentes produzidas termicamente, assim como recombinações. (SENAI DR-BA, 2019).

Explicado a diferenciação entre os materiais semicondutores para condutores e isolantes, a explicação para o Efeito Fotovoltaico dá-se da seguinte forma:

O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto é mau condutor elétrico. Para alterar isto acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N). (NASCIMENTO, 2004).

Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentado Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P). (NASCIMENTO, 2004). Cada célula solar compõe-se de camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P, conforme a figura abaixo.

Figura 5: Princípio Fotovoltaico em uma célula



Fonte: Nascimento, 2004.

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

Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz incidir na célula, manterá este fluxo.

A intensidade da corrente elétrica gerada variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente. (NASCIMENTO, 2004).

Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é denominado “Efeito fotovoltaico”.

2.4 A ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar (ou outras formas apropriadas de energia). Entre os materiais mais adequados para a conversão da radiação solar em energia elétrica, os quais são usualmente chamados de células solares ou fotovoltaicas, destaca-se o silício. A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as melhores células apresentam um índice de eficiência de 25%. (MACHADO; MIRANDA, 2015).

A Quantidade de energia que o sol fornece todos os dias à Terra é suficiente para alimentar toda demanda energética diária do planeta diversas vezes. A superfície da Terra recebe cerca de 3×10^{24} joules por ano, ou seja, $9,5 \times 10^4$ TW (Terawatts) de energia solar, cerca de 10.000 vezes a mais do que toda população terrestre consome. Considerando que no ano 2000 o consumo global de energia foi de 13 TW e a estimativa para 2050 é de 30 TW, a energia enviada pelo sol está sobrando excessivamente. (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Para a geração de eletricidade em escala comercial, o principal obstáculo tem sido o custo das células solares. Atualmente os custos de capital variam entre 5 e 15 vezes os custos unitários de uma usina a gás natural que opera com ciclo combinado. Contudo, nos últimos anos tem-se observado redução nos custos de capital. Os valores estão situados na faixa de US\$ 200 a US\$ 300 por megaWatt-hora e entre US\$ 3 e US\$ 7 mil por KWatt instalado. (MACHADO; MIRANDA, 2015).

2.5 CÉLULA DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

Estas células obtêm-se a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas (0,4 – 0,5 mm² de espessura). A sua eficiência na conversão da luz solar em eletricidade é superior a 12%. (NASCIMENTO, 2004). A tecnologia monocristalina é a mais antiga e possui a eficiência mais alta. Os painéis solares de silício monocristalino (mono-Si) são facilmente reconhecíveis olhando de perto. Possuem uma cor uniforme, indicando silício de alta pureza e cantos tipicamente arredondados. (PORTAL SOLAR, 2019).

Eles são feitos a partir de um único cristal de silício ultrapuro, (lingotes de silício de forma cilíndrica), este é fatiado fazendo assim lâminas de silício individuais, que são então tratadas e transformadas em células fotovoltaicas. Cada célula fotovoltaica circular tem seus “4 lados” cortados fora para otimizar o espaço disponível no painel solar monocristalino e aproveitar melhor a área do painel. O painel solar é composto por uma matriz de células fotovoltaicas em formações de série e paralelo. (PORTAL SOLAR, 2019).

2.6 CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINO

Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor do que nas de silício monocristalino. (NASCIMENTO, 2004). Os primeiros painéis solares à base de silício policristalino, que também são conhecidos como polissilício (p-Si) e silício multicristalino (mc-Si), foram introduzidos no mercado em 1981. Ambos, mono e poli cristalino são feitos de silício, a principal diferença entre as tecnologias é o método utilizado na fundição dos cristais. No policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, desta forma preservando a formação de múltiplos cristais (daí o nome poli cristalino). Quando este bloco é cortado e fatiado, é possível observar esta formação múltipla de cristais. (PORTAL SOLAR, 2019).

Uma vez fundido, eles são serrados em blocos quadrados e, em seguida, fatiados em células assim como no monocristalino, mas é um pouco mais fácil de produzir. Eles são semelhantes aos de um único cristal (monocristalino) tanto no desempenho como na degradação, exceto que as células são ligeiramente menos eficientes. (PORTAL SOLAR, 2019).

2.7 CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO

Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%. (NASCIMENTO, 2004).

2.8 O PAINÉL FOTOVOLTAICO

Um painel fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas ligadas entre si, que, quando conectados, formam um módulo fotovoltaico. Existem painéis entre a gama dos 10Wp até 140Wp para sistemas isolados a 12V e 195Wp para sistemas a 24V. Um

painel solar apresenta a forma quadrada ou retangular, com uma área geralmente compreendida entre 0,1 e 0,5 metros quadrados. Este apresenta também uma espessura de 3 cm, apresentando um peso entre os 6 e 7 kg. (PINTO, C. et al., 2015).

Cada painel apresenta diferenças características. Tome-se como exemplo um painel fotovoltaico típico de 65 Watts. A sua potência máxima é de 65W, a sua tensão máxima potência é de 17.4V, corrente da máxima potência é de 3.75A, tensão máxima dos sistemas 600V e, por fim, dimensões de 751x652x54 (altura x largura x espessura). (PINTO, C. et al., 2015).

Sendo algumas características mecânicas:

- Cobertura de vidro temperado ou de materiais orgânicos;
- Várias camadas de silicone com o objetivo de evitar a degradação do mesmo. As camadas de silicone são ideais, já que são transparentes, não perdem as suas propriedades e têm um preço acessível;
- Diversas camadas protetoras (normalmente de vidro), de modo que a luz que atravessa as células possa ser de novo aproveitada;
- Aço de inox, de maneira a garantir a melhor estabilidade do painel.

3. METODOLOGIA

Para melhor desenvolvimento do presente trabalho, ele foi dividido em módulos de pesquisa, onde cada módulo possui um objetivo a ser atingido e, para desenvolvimento do módulo seguinte, é necessário que o módulo anterior esteja pronto, com seu objetivo alcançado. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade e projetar um sistema fotovoltaico conectado à rede para atender uma demanda de iluminação em Corrente Contínua. Desta forma, deverá ser feito o levantamento de cargas e a avaliação do projeto em relação a sua iluminação média e em relação a sua eficiência energética. Em relação aos procedimentos de coleta de dados, a pesquisa pode ser classificada como bibliográfica documental.

MÓDULO 1 – Conceituando a Energia Solar Fotovoltaica

Nessa fase inicial da pesquisa, realizou-se o levantamento bibliográfico sobre a Energia Solar Fotovoltaica, buscando expor em miúdos: o princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica; as partes constituintes de um painel solar fotovoltaico, expondo cada componente, os meios de fabricação e sua função; a história da energia solar fotovoltaica, desde a descoberta do princípio fotovoltaico até o desenvolvimento das primeiras células solares, traçando uma linha do tempo da evolução desta tecnologia.

MÓDULO 2 – Desenvolvimento teórico do projeto.

Após a realização do módulo anterior, nessa fase da pesquisa será feito o desenvolvimento teórico do sistema de geração de energia solar fotovoltaico e sua integração com o circuito iluminação residencial baseado em C.C..

O módulo de desenvolvimento teórico consiste no dimensionamento do sistema, sendo dividido em três etapas que abarcam os seguintes pontos: Estipulação de carga a ser alimentado, dimensionamento do banco de baterias e geração de energia elétrica.

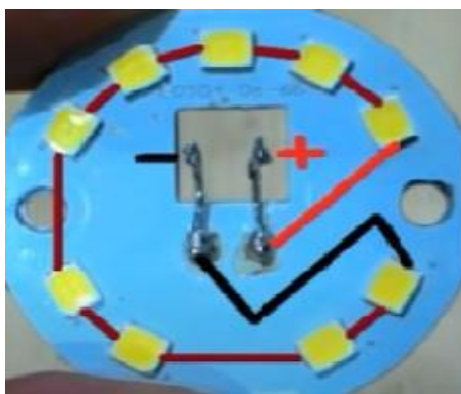
Para desenvolvimento da primeira etapa, foi definido que o circuito de alimentação terá oito pontos de luz, dispostos em uma residência contendo dois dormitórios, um banheiro, uma cozinha, uma sala e uma área de serviço, com a disposição sendo: um ponto de luz em cada dormitório, um ponto no banheiro, um na área de serviço e dois pontos na sala e na cozinha. A disposição dos pontos de luz é

meramente ilustrativa, pois a autonomia do sistema indefere da disposição dos pontos luz, como será demonstrado no decorrer do capítulo.

Uma vez que o projeto visa à eficiência energética, foi decidido pela utilização de lâmpadas LED de 220 V e 12 W de potência para serem empregadas nos pontos de luz, pois apresentam maior eficiência energética e durabilidade, acarretando um custo-benefício satisfatório. Tendo como objetivo a não utilização de inversores de correntes, sendo o projeto voltado para a utilização da Corrente Contínua, as lâmpadas LED convencionais necessitam de adaptação para operar em C.C., uma vez que a tensão que será empregada difere da tensão nominal da rede. Portanto, é necessário um procedimento de conversão da lâmpada LED escolhida, convertendo-a de 220 V para 12 V, mantendo sua potência.

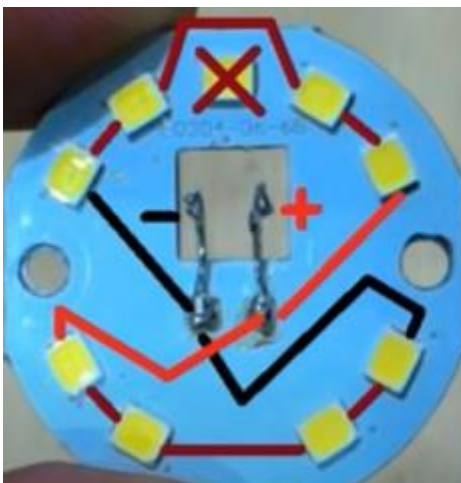
Para tal conversão, é necessário retirar a fonte interna presente nas lâmpadas e realizar uma modificação no circuito interno de LED, conforme as imagens abaixo.

Figura 6: Esquema original de ligação.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7: Novo esquema de ligação.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Realizado o procedimento de conversão, as lâmpadas passam a operar em 12 V e com mesma potência de 12 W, sendo assim, respeitando o princípio de igualdade entre a potência e o produto da tensão pela corrente, regido pela seguinte equação: $P=V.I$, as lâmpadas aumentam o consumo de corrente elétrica, totalizando 1 A/h. Sendo assim, calcula-se que o consumo das oito lâmpadas operando simultaneamente seja de 8 A/h. Assume-se que a média de tempo sem iluminação solar seja de 12 horas por dia, o sistema será projetado visando uma autonomia de 14 horas, levando em consideração utilização das lâmpadas em 100%, ou seja, o consumo de 8 A/h durante 14 horas. Uma vez que a utilização de 100% é puramente hipotética, a autonomia do sistema será garantida por uma larga margem, acrescida das duas horas adicionais já estipuladas.

A segunda etapa é voltada para o dimensionamento do banco de baterias. Uma vez que as oito lâmpadas funcionando simultaneamente consomem 8 A/h e levando em consideração uma perda de 10% da energia devido a perdas e má eficiência, totalizando 8,8 A/h, o modelo de bateria que melhor atende a necessidade do sistema é de 12 V e 10 A/h, com uma unidade garantido 1 h ~ 1,5 h de autonomia para o sistema em 100% de utilização, sendo necessário 10 baterias para atingir a autonomia prevista de 14 horas.

A terceira etapa de desenvolvimento visa estabelecer qual painel fotovoltaico deverá ser utilizado para geração de energia elétrica. Para isso, o painel que melhor atende as necessidades deve ser de 155 Wp, com capacidade de geração de 487 Wh por dia e em 12 V. É necessário um controlador de carga PWM de 10 A para integração com o banco de baterias.

Uma vez terminada as etapas anteriores de dimensionamento, é necessário um levantamento de preços dos itens apresentados para confecção de um orçamento.

Itens	Unidades	Valor
Lâmpada LED 12 W	8 unidades	R\$ 20,00 por unidade
Bateria 12 V e 10 A/h	10 unidades	R\$ 100,00 por unidade
Painel Fotovoltaico 155W com controlador de carga 10 ^a	uma unidade	R\$ 389,15

Os valores da tabela acima apresentam média de mercado, com intuito de auxiliar a compreensão das equações presentes no decorrer do capítulo, podendo sofrer alterações com o desenvolvimento do projeto.

O sistema fotovoltaico foi calculado para atender o sistema de iluminação em C.C. Para tal, será utilizado o software PVsyst. Sendo este um software de simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados. No caso do presente projeto, trata-se de um sistema isolado, uma vez que é visado atingir um determinado grau de independência da rede pública de energia elétrica.

Deve-se definir qual será o módulo fotovoltaico para utilização do software. Isto deve ser feito analisando a área disponível para a instalação dos módulos e/ou a potência que deseja instalar para suprir determinada carga.

Finalizado, deve-se levar em consideração as perdas no sistema com relação ao sombreamento e o software nos fornecerá uma análise anual com vários parâmetros para analisar a eficiência do sistema. Alguns desses parâmetros são: irradiação global horizontal, irradiação global incidente no módulo fotovoltaico, irradiação efetiva global incidente no módulo fotovoltaico considerando sombreamento, energia efetiva na saída do conjunto, energia injetada na rede, rendimento global do sistema e energia média produzida por dia.

Foi realizado o levantamento de custos dos componentes principais do sistema fotovoltaico: módulos fotovoltaicos, suporte para o módulo, banco de baterias e controlador de cargas. Uma vez que o projeto visa a redução de custo, foi descartada a utilização de inversor, o que reduzirá em boa porcentagem o investimento inicial do projeto. Sendo o circuito de iluminação operado em C.C. e os sistema fotovoltaico gerado energia elétrica em C.C., torna-se dispensável a presença de inversor.

Foi calculado o fator de capacidade de um sistema (FC), que representa a capacidade que um sistema possui de produzir energia se operasse em sua potência nominal durante 24 horas por dia. O fator de capacidade é dado, pela seguinte equação:

$$FC(\%) = \frac{Eg(MWh)}{Pn(MWp) \cdot 24h \cdot 365} \cdot 100$$

Onde fator de capacidade do sistema (Fc), energia produzida pelo sistema em um ano (Eg) e a potência nominal do sistema fotovoltaico (Pn).

O cálculo da energia economizada é dada pela quantidade de energia produzida durante o ano pelo módulo fotovoltaico dividido pela tarifa em R\$/kWh, que paga à concessionária. Sendo a seguinte equação:

$$\text{valor economizado} = Eg(\text{ano}) \cdot T$$

Deve-se calcular o período de retorno simples (PRS) que mede o prazo necessário para recuperar o investimento realizado, resultante da relação entre o investimento inicial em eficiência energética e as economias obtidas a cada ano, é dada pela equação:

$$PRS = \frac{\text{Investimento Inicial (R\$)}}{\text{Economia por ano}} = \text{Retorno do investimento (em anos)}$$

Solucionado a questão referente à redução de custo, o passo seguinte se dá pela aplicação de um método para o aumento de eficiência do sistema fotovoltaico. Até o presente momento da pesquisa, não se encontrou um método direto, que seja viável, para o aumento de eficiência, com isso, a solução desse problema se dá pelo o uso de métodos indiretos. Sendo o método direto relacionado a alguma mudança no módulo fotovoltaico e o método indireto referente a fatores externos, como por exemplo, a angulação do módulo em relação a taxa de incidência de luz solar no local em que será instalado o painel fotovoltaico.

O método para aumento de eficiência se dará pelo o calculo de incidência solar que painel será exposto durante o funcionamento do circuito de iluminação e, quando não em funcionamento, o período de recarga do banco de baterias. Tal cálculo levará em conta a taxa de incidência solar no local da instalação, diária e anual, o que permitirá a instalação do painel com angulação que permita a máxima eficiência de produção energética. Outro a ser levado em consideração é a geografia do local, procurando instalar o módulo fotovoltaico longe do risco de danos mecânicos e, se possível, fora do alcance de poluição. Uma vez que a deposição de sedimentos ao longo do tempo, como a poeira, sob a superfície do painel pode reduzir a eficiência do mesmo.

4. CRONOGRAMA

2020	Mês				
Atividades	Março	Abril	Maio	Setembro	Outubro
Ajustes do TCC	X	X			
Escolha do software		X	X		
Simulação e testes no software				X	X
Banca de avaliação				X	
Exposchimdt					X
Mostratec					

5. RESULTADOS ESPERADOS

Busca-se com este projeto elaborar um painel fotovoltaico com uma maior eficiência e com um menor custo, visando um fácil acesso a população. Isso fará com que cada vez mais pessoas utilizem esta fonte de energia renovável e, conseqüentemente, diminuirá o uso de fontes energéticas provenientes de combustíveis não renováveis.

Após algumas pesquisas, observou-se que uma boa aplicação do projeto seria em circuitos de iluminação, residencial e público, em CC, pois atualmente os circuitos de iluminação tem um baixo consumo.

6. REFERÊNCIAS

- BELL LABS. **Innovations that changed the world**. Disponível em: <https://www.bell-labs.com/about/history-bell-labs/stories-changed-world/>.
- BLUESOL ENERGIA SOLAR. **Efeito Fotoelétrico e Efeito Fotovoltaico**. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/efeito-fotoeletrico-fotovoltaico/>.
- BP ENERGY ECONOMICS. **Statistical Review of World Energy**. 2018. Centre for Energy Economics Research and Policy, Heriot-Watt University, 2018, Londres.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia Solar**. Brasília, [20-?]. 14 p..
- BUHLER, A. J. **PRINCÍPIOS BÁSICOS DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA, HISTÓRICO E STATUS ATUAL DESTA TECNOLOGIA**. *In.*, Seminário Internacional de Construções sustentáveis, 2., 2016, Passo Fundo.
- CEPEL. **Energia Solar Fotovoltaica, Estágio Atual e Perspectivas**. *In.*, Congresso Internacional de Energia Renovável, 1, 2003, Recife.
- DA SILVA, R.G.. **Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Atender uma Demanda de Iluminação**. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Bacharelado em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual de Londrina, 2014.
- DIENSTMANN, Gustavo. **Energia Solar: uma comparação de tecnologias**. 2009. 92 p. Projeto de Diplomação (Graduação) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009, Porto Alegre.
- IEA. **Shaping a secure and sustainable energy future**. Disponível em: <https://www.iea.org/>.
- NASCIMENTO, C. A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. 2004. 21 p. Monografia (Pós-Graduação) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Lavras, 2004, Lavras.
- PIEIDADE, Moisés. **Semicondutores: De Faraday a Bardeen, Schokeley, Brattain e outros**. 2017.
- PINTO, C. et al. **Energia Solar: Painéis Fotovoltaicos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do porto, 2014/2015.
- PORTAL SOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>.
- SUIÇA. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Geneva, 2019.