

Bianca de Oliveira

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ALIMENTAÇÃO DE CARGAS
PONTUAIS**

Taubaté - SP

2017

Bianca de Oliveira

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ALIMENTAÇÃO DE CARGAS
PONTUAIS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em **Engenharia Elétrica e Eletrônica.**

Orientador: Prof. Rubens Castilho Júnior

Taubaté - SP

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

Oliveira, Bianca de

O482e Energia solar fotovoltaica para alimentação de cargas pontuais. / Bianca de Oliveira. – 2017.

64. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, 2017

Orientador: Prof. Rubens Castilho Júnior, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.

1. Energia renovável. 2. Sustentabilidade. 3. Carga pontual. I. Título.

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ALIMENTAÇÃO DE CARGAS
PONTUAIS**

BIANCA DE OLIVEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. RUBENS CASTILHO JÚNIOR
Orientador/UNITAU-DEE


Prof. MAURO PEDRO PERIS
UNITAU-DEE


Eng. RODRIGO JOSÉ LANDRONI DOS REIS
Membro Externo

Dezembro de 2017

Dedico este trabalho à minha mãe que foi a grande incentivadora desta empreitada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À minha mãe Silvia.

Ao professor orientador Rubens, pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo tornar acessível a utilização de energia solar fotovoltaica por famílias de baixa renda, bem como, propor uma solução energética que não agrida o meio ambiente, visto que, atualmente devido à intermitência das usinas hidrelétricas, o Brasil vem utilizando energia proveniente de fontes consideradas não limpas, além de proporcionar a diminuição da necessidade energética do país. Portanto, esse projeto dá ênfase a um sistema de comutação entre a geração fotovoltaica e a rede de energia elétrica, quando o sistema fotovoltaico não for suficiente. Para evitar danos aos equipamentos e à rede elétrica, já que o inversor não é configurado para atuar em paralelo com a rede, propõe-se que haja um tempo morto entre as comutações, o qual servirá para que o motor esteja completamente sem movimento, não funcionando como um gerador. O refrigerador, devido ao seu isolamento térmico, poderá ficar desligado por um período de tempo sem que os alimentos nele armazenado possa sofrer danos.

PALAVRAS-CHAVE: Energia renovável. Sustentabilidade. Carga pontual.

ABSTRACT

This work has the objective to make accessible the utilization of photovoltaic energy to low income families, as well, propose an energetic solution that is not harmful to the environment, seen that, now a days due to the intermittency of hydroelectric power plants, Brazil have been utilizing coming from sources considered nonrenewable, besides of proportioning the decrease on electrical demand on the country. Therefore, this project gives an emphasis in a system of commutation between photovoltaic generation and the electrical power supply, when the photovoltaic becomes insufficient. To avoid damage to the equipment and to the electrical power supply, due to the fact that the Inversor is not configured to act in parallel with the power supply, it's proposed that there is a dead time between the commutations, which will serve to the motor be completely without movement, not working as a generator. The refrigerator, due to its thermic isolation, will be able to be turned off for a period without the aliments stored inside it may suffer damage.

KEYWORDS: Renewable Energy. Sustainability. punctual charge

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Painel fotovoltaico	17
Figura 2	Extrato da patente da primeira célula solar	19
Figura 3	Calvin Fuller preparando uma amostra de silício	19
Figura 4	Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e sua primeira célula solar	20
Figura 5	A primeira aplicação de uma célula solar de silício	20
Figura 6	O primeiro satélite com células solares	23
Figura 7	Espectro eletromagnético	24
Figura 8	Efeito fotovoltaico na junção Pn	26
Figura 9	Cristal de quartzo	27
Figura 10	Cristal de quartzo	28
Figura 11	Célula do tipo monocristalino	29
Figura 12	Células solares de GaAs de alta eficiência cobrindo o satélite MidSTAR-1	29
Figura 13	Célula de silício policristalino	30
Figura 14	Célula de silício amorfo	31
Figura 15	Células híbridas	32
Figura 16	Amostra de telureto de cádmio	33
Figura 17	Diodo de bypass	36
Figura 18	Diodo de bloqueio	36
Figura 19	Curva característica I x V típica de uma célula de silício	37
Figura 20	Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício	38
Figura 21	Curvas I x V e P x V parâmetros de potência máxima	38
Figura 22	Arduino Uno	42
Figura 23	Interface de um Arduino Uno	42
Figura 24	Microcontrolador ATmega328	43
Figura 25	Indicação de partes importantes do Arduino Uno	45
Figura 26	Curva do funcionamento do painel solar	47
Figura 27	Funcionamento do painel em aberto	48
Figura 28	Topologia do regulador de tensão para a alimentação dos subsistemas	50
Figura 29	Iversor de tensão Hayonik 400W 12V para 127V transformador conversor multiuso onda modificada	51
Figura 30	Onda senoidal pura, modificada e quadrada	51

Figura 31 Quadro com o resultado para os dados exemplificados	53
Figura 32 Quadro com dados comerciais dos painéis	53
Figura 33 Média anual do tempo de insolação diária	54
Figura 34 Quadro com cálculo do tempo de amortização do investimento	55
Figura 35 Simulação do funcionamento do circuito	56
Figura 36 Curva de tensão versus corrente de um painel fotovoltaico superposta à curva de tensão de uma fonte DC	57
Figura 37 Simulador Uno ArduSim	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	15
1.2	MOTIVAÇÃO	15
1.3	JUSTIFICATIVAS	15
1.4	METODOLOGIA	15
1.5	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	15
1.6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	17
2.1	HISTÓRICO	17
2.2	DESCRIÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO	24
2.3	TIPOS E MATERIAIS DE PLACAS SOLARES	26
2.3.1	Silício Monocristalino (C-SI)	28
2.3.2	Célula de GaAs	29
2.3.3	Silício (SI) Policristalino	30
2.3.4	Silício Amorfo (a-Si)	30
2.3.5	Células Híbridas	31
2.3.6	Células de Telureto de Cádmio (CDTE)	32
2.3.7	Células de Disseleneto de Cobre e Índio (CUINSE2 ou CIS)	33
2.3.8	Células Poiliméricas/Orgânicas	33
2.3.9	Células Multijunção	34
2.4	DESCRIÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO	34
2.4.1	Proteção das Células dos Módulos	35
2.5	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS E MÓDULOS	37
2.6	TOPOLOGIAS COMUNS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	39
3.	ARDUINO	41
3.1	CONCEITO DE ARDUINO	41
3.2	COMPONENTES DO ARDUINO	41
3.2.1	Microcontrolador ATmega328	43
3.2.2	Soquete de Cabeçalho	43
3.2.3	Pinos digitais e analógicos	44
3.2.4	Pinos de alimentação	44
3.2.5	Soquete USB	44

3.2.6 Conector de alimentação externo	44
3.2.7 Botão de reset	45
3.2.8 Leds	45
3.2.9 Interfaces de programação	46
3.2.10 Programando o Arduino	46
4 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E CARGAS PONTUAIS	47
4.1 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	47
4.2 PROGRAMA PAINEL SOLAR	50
4.3 INVERSOR	50
4.4 DETERMINAÇÃO DE CARGA DE PAINÉIS SOLARES	52
4.5 RELAÇÃO DE CUSTO E TEMPO DE AMORTIZAÇÃO DO INVESTIMENTO ...	54
5 SIMULAÇÃO	56
6 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE A - Programa em Arduino Uno	62

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
C	Capacitância
c	Velocidade da luz, velocidade da propagação de um fluido
D	“duty cycle” – ciclo de trabalho
e	Carga elétrica fundamental
E	Energia, energia absorvida por um fóton, campo elétrico
F	Força
h	Constante de Plack, altura
HP	“horse-power” – 746 W
I	Corrente elétrica
L	Indutância
nm	Nanômetro
P	Perdas, potência dissipada
Q, q	Carga elétrica
r	Raio, distância
R	Resistência elétrica
S	Área, potência
t	Tempo
U	Potência elétrica
US\$	Dólar americano
V	Potencial elétrico, tensão elétrica, volume
Vol	Volume
W	Potência elétrica
x	Raio, distância Comprimento de onda Micrômetro Angstrom – 10 – 10 m
MIT	Massachusetts Institute of Technology, Motor de Indução Trifásico

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo mostrar como é possível utilizar energia renovável com custo mais acessível, por meio de chave seccionadora, a qual, havendo radiação solar suficiente irá utilizar o sistema solar e não havendo, irá mesclar seu uso com o uso da rede elétrica. Essa chave faz com que não haja necessidade de armazenar energia.

1.2 MOTIVAÇÃO

Tornar a energia renovável acessível à população carente e promover conscientização da sociedade no que tange à importância de se investir neste modelo de geração de energia.

1.3 JUSTIFICATIVAS

O trabalho se justifica pela viabilidade econômica a ser obtida por meio de uma chave capaz de comutar painéis para a rede sempre que necessário, ou seja, na insuficiência da energia solar. Esse sistema terá um tempo morto de cinco segundos para evitar que ocorra simultaneamente o uso da rede e da energia solar na alimentação de um aparelho elétrico.

1.4 METODOLOGIA

Foi realizada pesquisa na área de eletrônica, observando-se as formas de alimentação de energia, por meio de consulta a catálogos de componentes, visando ao desenvolvimento do sistema.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O capítulo 2, “Introdução sobre painéis fotovoltaicos”, explora os painéis fotovoltaicos, abordando uma breve descrição do efeito fotoelétrico, dos tipos de materiais de células solares, dos modelos elétricos de células solares e de topologias comuns de painéis solares.

O capítulo 3, “Sistema de Alimentação de Cargas Intermitentes”, enfoca o sistema proposto por este trabalho, descrevendo detalhadamente cada parte dele, os circuitos utilizados e como interagem entre si.

O capítulo 4, “Resultados” descreve os resultados obtidos e explica como foram alcançados.

O capítulo 5 trata das conclusões, inclusive apontando possíveis tópicos nos quais trabalhos futuros acerca do mesmo tema podem se aprofundar.

1.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Costa (2014) focou no desenvolvimento de um sistema de alimentação e chaveamento temporizado entre painéis fotovoltaicos e a rede elétrica para atender a demanda energética de uma carga intermitente.

Marcelino e Prado (2014) propuseram um sistema comutador temporizado para a utilização de energias alternativas para cargas intermitentes. O pedido de patente exemplifica o sistema comutador e seu funcionamento, assim como suas tabelas verdades para que o sistema opere em segurança.

Em Nassabay (2011) foi apresentado um sistema para alimentação de uma carga pontual que forneça energia solar quando possível e comute para a rede de energia quando necessário. Demonstra também o padrão construtivo de um painel fotovoltaico.

Programação com Arduino. Passos Avançados com Sketches - Volume 2. Série Tekne foi apresentada a programação do sistema utilizando-se o Arduino.

Em Neosolar foram apresentados dados comerciais sobre o painel *Canadian CSI CS6p-255P (255Wp)*. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-canadian-csi-cs6p-255p-255wp.html>> Acesso em 17 de maio de 2016.

Em Neosolar foram apresentados dados comerciais sobre o painel *Yingli YL250P 29b (250Wp)*. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl250p-29b-250wp.html>> Acesso em 17 de maio de 2016.

2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

2.1 HISTÓRICO

Um Painel Solar é formado por células normalmente de silício que captam a luz do sol e a transformam em energia elétrica DC. A esse fenômeno é dado o nome de efeito fotovoltaico. Sua eficiência vem sendo aprimorada para que a maior quantidade de luz solar seja convertida em energia elétrica. Quando *On grid*, o sistema necessita das placas solares e de um inversor, e quando *off grid*, utiliza placas solares, baterias, um controlador de carga para alimentação DC.

Figura 1 - Painel fotovoltaico.



Fonte: (Mercado livre, 2017)

Em 1839 o efeito fotovoltaico foi observado por Edmond Becquerel, que percebeu que, quando expostas à luz, as placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas em um eletrólito, produziam uma diferença de potencial. Em 1877, W. G. Adams e R. E. Day desenvolveram o primeiro dispositivo sólido que produz eletricidade quando exposto à luz, o selênio. Com baixa eficiência de conversão, em torno de 0,5%, o filme de selênio depositado num substrato de ferro com um segundo filme de ouro, servia de contato frontal. No final do século XIX, foram comercializadas pelo engenheiro alemão Werner Siemens (fundador de império industrial homônimo), células de selênio que seriam usadas como fotômetros para máquinas fotográficas.

Na primeira metade do século XX, a energia fotovoltaica teve que esperar grandes desenvolvimentos, Albert Einstein em 1905 nomeou a explicação do efeito fotoelétrico e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício.

Pearson fez a primeira célula de silício e a compartilhou com o engenheiro Daryl Chapin, seu colega nos Bell Labs, que ensaiara células solares de selênio cujo resultado era decepcionante: 1%, na sua procura por uma solução que substituísse baterias em redes telefônicas remotas.

Quando eles ensaiaram a célula de silício verificaram que a conversão era de 4%. Encontraram vários obstáculos a partir dessa nova célula, um deles foi a resistência em série, devido à dificuldade em soldar os contatos elétricos ao material.

Também observaram que o lítio migrava para o interior da célula de silício, mesmo em temperatura ambiente, pela junção p-n (a “zona ativa” da célula solar), tornava-se inacessível aos fótons da radiação solar devido à profundidade que atingia, diminuindo a eficiência da célula.

A história da primeira célula solar começou em Março de 1953, quando Calvin Fuller, um químico dos Bell Laboratories (Bell Labs), em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades elétricas (um processo chamado “dopagem”).

Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena concentração de gálio, que o torna condutor, sendo as cargas móveis positivas (e, por isso, é chamado silício do “tipo p”). Seguindo as instruções de Fuller, o físico Gerald Pearson, seu colega no Bell Labs, mergulhou esta barra de silício dopado num banho quente de lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de electrões livres, portadores de carga negativa (e, por isso, chamados de silício do “tipo n”).

Na região onde o silício “tipo n” fica em contato com o silício “tipo p”, a “junção p-n”, surge um campo elétrico permanente. Ao caracterizar eletricamente esta amostra, Pearson verificou que produzia uma corrente elétrica levando-o à publicação no *Journal of Applied Physics* e a um registro de patente, em Março de 1954.

podia ler-se que a primeira célula solar “marca o princípio de uma nova era, levando, eventualmente, à realização de um dos mais belos sonhos da humanidade: a colheita de energia solar sem limites, para o bem-estar da civilização”. O painel, com nove células com 30 mm de diâmetro, foi montado em Outubro de 1955 e removido em Março de 1956. Os resultados foram promissores, embora tivesse ficado coberto por uma massa opaca de fezes ornitológicas. Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller desenvolveram a primeira célula solar nos Laboratórios da Bell Telephone C. em 1954.

Fig. 4 - Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e sua primeira célula solar



Fonte: (Gazeta,2006)

No entanto, rapidamente se compreendeu que o custo das células solares era demasiado elevado, pelo que a sua utilização só podia ser economicamente competitiva em aplicações muito especiais, como, por exemplo, para produzir eletricidade no espaço. Recordemos que o primeiro satélite, o Sputnik, lançado em 1957, acabara de inaugurar oficialmente a corrida ao espaço entre os Estados Unidos e a União Soviética. A primeira aplicação de uma célula solar de silício foi como fonte de alimentação de uma rede telefônica local em Americus, na Geórgia, Estudos Unidos da América, em 1955.

Fig. 5 – A primeira aplicação de uma célula solar de silício.



Fonte: (Gazeta,2006)

Inicialmente, os satélites usaram pilhas químicas ou baseadas em isótopos radioativos. As células solares eram consideradas uma curiosidade, e foi com grande relutância que a NASA aceitou incorporá-las, como back-up de uma pilha convencional, no Vanguard I, lançado em Março de 1958 (Fig. 5). A pilha química falhou, mas o pequeno painel com cerca de 100 cm², que produzia quase 0,1W, manteve o transmissor de 5 mW em funcionamento muito para além de todas as expectativas: o Vanguard I manteve-se operacional durante oito anos. Depois desta demonstração de fiabilidade, durabilidade e baixo peso, o programa espacial norte-americano adotou as células solares como fonte de energia dos seus satélites. Também o programa espacial soviético viu nas células solares a solução para uma fonte de energia inesgotável para os seus satélites. Dois meses depois do lançamento do Vanguard I, foi a vez do Sputnik-3 e muitos outros se seguiram nas décadas seguintes. Hoje, todos os veículos espaciais são equipados com células solares, desde a International Space Station aos Mars Rover, que ao fim de dois anos continuam a percorrer o solo marciano.

O desenvolvimento de células solares cada vez mais eficientes para utilização no espaço levou a alguns avanços tecnológicos importantes na década que se seguiu. É o caso da substituição, a partir de 1960, do contato frontal único por uma rede de contatos mais finos, porém espalhados, reduzindo a resistência em série e aumentando a eficiência. As décadas de oitenta e noventa foram também marcadas por um maior investimento em programas de financiamento e de demonstração motivados, sobretudo pela consciência crescente da ameaça das alterações climáticas devido à queima de combustíveis fósseis. Exemplos destas iniciativas são: a instalação da primeira central solar de grande envergadura (1 MWp) na Califórnia, em 1982, e o lançamento dos programas de “telhados solares” na Alemanha (1990) e no Japão (1993). Os poderes políticos compreenderam então que a criação de um verdadeiro mercado fotovoltaico não poderia basear-se apenas no desenvolvimento tecnológico, aumentando a eficiência das células (como na época da corrida ao espaço), ou reduzindo o seu custo de produção (como depois da crise do petróleo), mas também por meio de uma economia de escala, ou seja, quantas mais células fossem fabricadas, menor seria o custo unitário. Um exemplo do impacto deste tipo de política fica bem claro quando se consultam as conclusões de um estudo financiado pela Comissão Europeia, o MUSIC FM, que mostrou que, utilizando tecnologia atual, melhorada apenas por investigação focada com resultados previsíveis, uma fábrica de painéis solares com um nível de produção da ordem dos 500 MW

anuais levaria a uma redução dos custos dos painéis solares para valores competitivos com a energia convencional (1 euro/Wp).

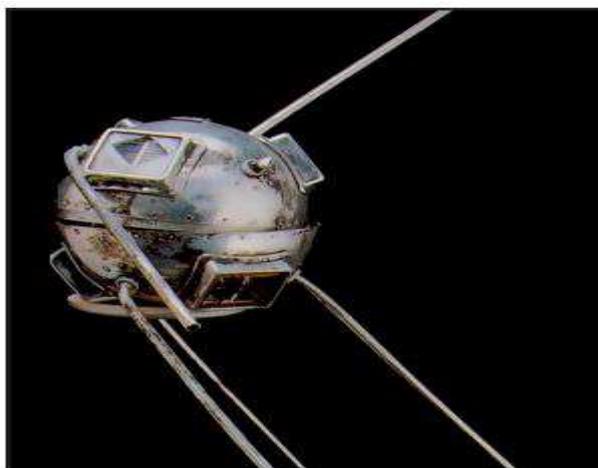
Foi do resultado de iniciativas de estímulo ao mercado fotovoltaico, como por exemplo, a lei das tarifas garantidas na Alemanha, que resultou o crescimento exponencial do mercado da eletricidade solar verificado no final dos anos noventa e princípios deste século: em 1999 o total acumulado de painéis solares atingia a fasquia do primeiro gigawatt, para, três anos depois, o total acumulado ser já o dobro. Entretanto, o desenvolvimento tecnológico do fotovoltaico não para. Assim, em 1998 foi atingida a eficiência recorde de 24,7%, com células em silício monocristalino, enquanto, no ano passado, o grupo do Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems anunciou uma eficiência superior a 20% para células em silício multicristalino.

Células solares com configurações mais complexas, as chamadas células em cascata (ou tandem), que consistem na sobreposição de várias células semicondutoras, cada uma com capacidade otimizada para um dado comprimento de onda da radiação, permitem atingir rendimentos de conversão superiores a 34% do programa espacial soviético, escolhendo substratos do tipo p, por ser mais econômico de produzir. Mais tarde, verificou-se que o silício do tipo p é mais resistente à radiação pelo que, depois da descoberta das cinturas de radiação de Van Allen, em 1960, o programa espacial norte americano começou também a desenvolver células em substrato do tipo p. Outro avanço importante foi a chamada “célula violeta”, dos COMSAT Laboratories. Esta célula tinha uma zona tipo n significativamente mais fina que as anteriores, o que permitiu eliminar a zona inativa da superfície, melhorando portanto a resposta no azul. A célula violeta obteve uma eficiência recorde de 13,5%. Destaque-se ainda a utilização de um campo elétrico na superfície posterior da célula (o Back Surface Field - BSF) criado por uma difusão de alumínio para melhorar a resposta da célula no vermelho³, e a texturização da superfície frontal para reduzir as perdas por reflexão. Mas, se o desenvolvimento das células solares nos anos sessenta foi, sobretudo motivado pela corrida ao espaço, o que levou a células mais eficientes, mas não necessariamente mais econômicas, foi nessa década que surgiram as primeiras aplicações terrestres. Foi o caso das células da SOLAREX, uma empresa de Joseph Lindmeyer, que começou a produzir painéis fotovoltaicos para sistemas de telecomunicações remotos e bóias de navegação. Este tipo de aplicações muito específicas eram então as únicas economicamente interessantes devido à inexistência de fontes de energia alternativas à eletricidade solar. Esta situação viria a mudar de figura quando, no outono de 1973, o preço do petróleo quadruplicou. O pânico criado pela

crise petrolífera de 1973 levou a um súbito investimento em programas de investigação para reduzir o custo de produção das células solares.

Algumas das tecnologias financiadas por estes programas revolucionaram as idéias sobre o processamento das células solares. É o caso da utilização de novos materiais, em particular o silício multicristalino (em vez de cristais únicos de silício, monocristais, muito mais caros de produzir) ou de métodos de produção de silício diretamente em fita (eliminando o processo de corte dos lingotes de silício e todos os custos associados). Outra inovação particularmente importante do ponto de vista de redução de custo foi a deposição de contatos por serigrafia em vez das técnicas tradicionais: a fotolitografia e a deposição por evaporação em vácuo. O resultado de todos estes avanços foi a redução do custo da eletricidade solar de 80 \$/Wp para cerca de 12 \$/Wp em menos de uma década. Do ponto de vista da eficiência de conversão das células solares, a barreira dos 20% de eficiência foi pela primeira vez ultrapassada pelas células de silício monocristalino. De acordo com imagem do Vanguard I, o primeiro satélite com células solares, lançado em Março de 1958 levando a bordo um pequeno painel solar com 100 cm² visível na janela em cima à esquerda.

Fig. 6 – O primeiro satélite com células solares



Fonte: (Gazeta,2006)

Atualmente, melhorias subsequentes na tecnologia fizeram os custos de produção chegarem a menos de 1US\$/W, enquanto os preços de venda chegam a menos de 2 US\$/W. Desde 2010 sistemas comerciais inteiros podem ser construídos por menos de US\$3,40. (Gazeta, 2006). Fora dos Estados Unidos, outros países a investirem massivamente nessa tecnologia são o Japão e Alemanha; ambos trabalham para baixar os custos de produção e

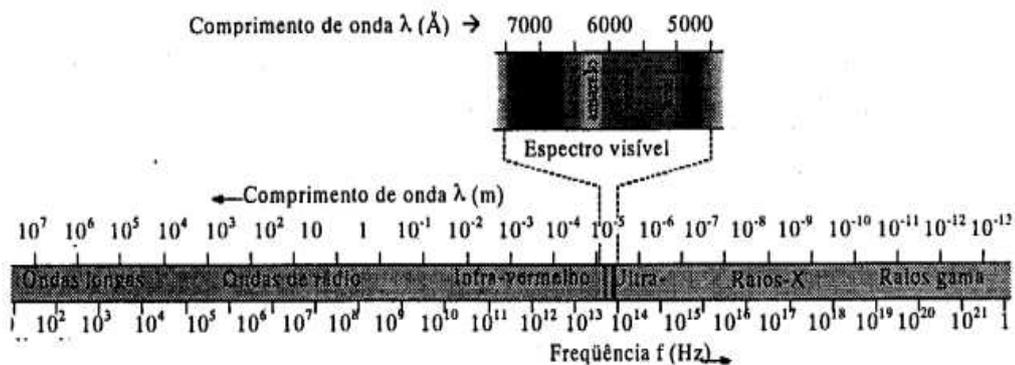
tornar a energia solar competitiva, por meio de pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas de produção (COSTA, 2014).

2.2 DESCRIÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

A emissão de elétrons por metais iluminados com luz de determinada frequência foi observada no final do século XIX por Hertz e Hallwachs.

O efeito fotoelétrico é observado, por exemplo, quando uma superfície metálica ou semicondutora é iluminada com luz numa certa faixa de frequências. Neste caso, elétrons ligados aos átomos são promovidos a elétrons livres, capazes de conduzir corrente elétrica. As várias faixas do espectro eletromagnético estão indicadas na Figura 7 em escalas de frequência (f) e do comprimento de onda $= c/f$, onde c é a velocidade da luz no vácuo, que vale aproximadamente 300.000 km/s. O Espectro eletromagnético em termos do comprimento de onda e da frequência f . O Ângstrom (\AA) está para o metro (m) assim como uma pulga está para a Terra.

Fig. 7 – Espectro eletromagnético



Fonte: (Valadares, E. C. et al, 2001)

Radiação com frequência abaixo de determinado valor mínimo não promove elétrons livres, não importa a intensidade da luz. Essa intensidade corresponde à potência emitida pela fonte luminosa. A luz, além de apresentar um comportamento ondulatório, pode ser pensada como uma forma de energia transmitida por partículas denominadas fótons.

A energia E de cada fóton que constitui um feixe de luz é dada pela relação $E = hf$ ou $E = hc/\lambda$, onde h é a constante de Planck, associada aos fenômenos atômicos. Quanto mais intenso for um feixe de luz, maior é o número de fótons nele presente. Quando o feixe incide sobre a superfície, cada elétron preso tem certa probabilidade de interagir com um fóton. Se a

energia hf do fóton for maior que a energia de ligação do elétron, denominada função trabalho, este pode ser libertado absorvendo toda a energia do fóton incidente.

O valor da função trabalho depende do material da superfície. Assim, para cada material, o efeito fotoelétrico ocorrerá apenas a partir de um valor mínimo da frequência f . De nada adiantará aumentar a intensidade do feixe de luz se a frequência do fóton for menor do que este valor mínimo. (Valadares, E. C. et al, 2001).

A teoria clássica de eletromagnetismo previa que esse efeito seria atribuído à transferência da energia da luz para o elétron, de onde se deduziria que uma alteração na amplitude ou no comprimento de onda corresponderia a uma alteração na taxa de elétrons emitidos pelo material. Também segundo a teoria clássica, existiria um atraso entre a emissão de elétrons e a incidência da luz, que seriam proporcionais entre si, e o efeito seria independente da frequência da onda. No entanto, as observações experimentais mostraram que não há relação entre energia cinética dos elétrons liberados e a intensidade da luz, não há atraso perceptível entre a incidência de radiação e ejeção de elétrons, e que para baixas frequências de onda, não se observa o efeito fotoelétrico (SERWAY, 1990).

Essa discrepância decorre do fato de que o sistema de trabalho nas equações de Maxwell é suposto como contínuo. Este problema decorria de que se ainda considerava a matéria no Universo como contínua, e não como quantizada. A teoria que considera a matéria como quantizada começou a ser aceita no final do século XIX devido aos trabalhos de Thomson, que descrevia a matéria como granular. Aquele problema era recorrente também em outros fenômenos da física, como o espalhamento luminoso. (ELERT, 1998). Outro problema era na descrição matemática da interação da matéria com ondas eletromagnéticas, pois o átomo de Thomson tem um raio da ordem 10^{-10} m, enquanto a luz tem um comprimento de onda muito maior do que o raio do átomo, variando entre 10^{-6} e 10^{-7} m.

Em 1905, Albert Einstein apresentou uma solução ao problema; ele publicou um artigo que propunha que a energia na onda de luz fosse discretizada em pacotes quantizados de energia, chamada de fótons. Os resultados previstos por Einstein foram confirmados por Robert Millikan em 1915, e Einstein recebeu o Nobel em 1921 pela descoberta da lei do efeito fotoelétrico.

A energia cinética máxima de um elétron ejetado é de:

$$K_{max} = h \cdot f - \varphi \quad (1)$$

Nesta equação, a energia cinética é dada por K_{max} , h é a constante de Planck, a frequência da onda é f , e φ seria a função trabalho, que determina a energia necessária para a ejeção do elétron. No entanto, a equação poderia ser reescrita, pois φ tem o valor dado por:

$$\varphi = h \cdot f_0 \quad (2)$$

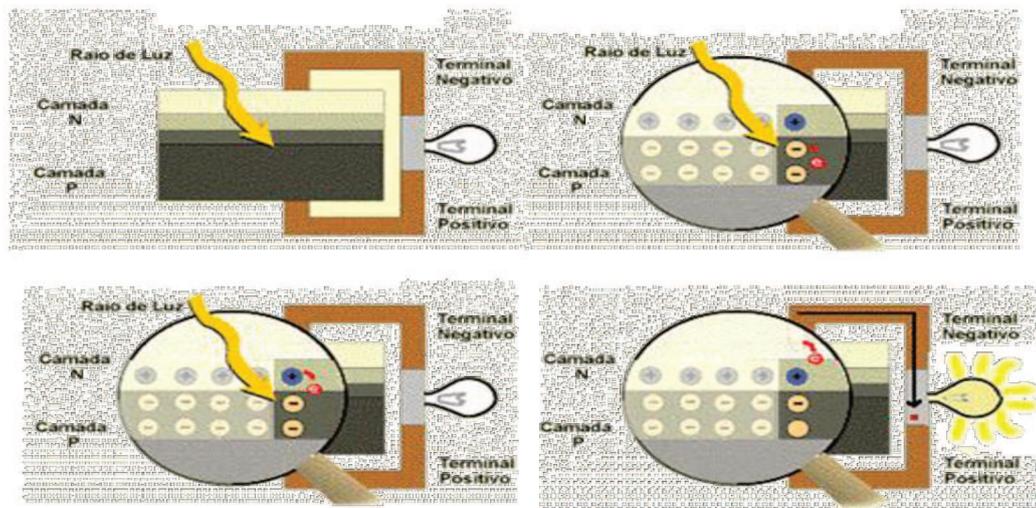
Onde f_0 é a frequência mínima requerida para a ejeção do elétron. Substituindo na equação de energia cinética, tem-se:

$$K_{max} = h \cdot (f - f_0) \quad (3)$$

Como K_{max} e h são positivos, a frequência f deve ser maior do que f_0 . (FROMHOLD,1991).

2.3 TIPOS DE MATERIAIS E PLACAS SOLARES

Figura 8 - Efeito fotovoltaico na junção pn



Fonte: (CRESESB, 2014)

A conversão da energia solar em energia elétrica é feita por meio de materiais semicondutores aplicados em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas ou células solares, com base no efeito fotovoltaico.

As células solares podem ser construídas com diferentes tipos de materiais. Os mais utilizados são o silício (Si), o arseneto de gálio (GaAs), o disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂) e o telureto de cádmio (CdTe), todos materiais semicondutores. De acordo com o processo de fabricação, são formadas estruturas atômicas denominadas monocristalinas, policristalinas ou amorfas, dependendo do alcance da uniformidade da distribuição dos átomos no material.

As células solares mais populares e disponíveis comercialmente são as de silício, contudo, a segunda geração de células solares é baseada na tecnologia de filmes finos. Esta tecnologia baseia-se no uso de camadas muito finas de materiais semicondutores dos quais o silício amorfo é o mais conhecido.

Dispositivos de filmes finos, além de requererem pouca quantidade de material para fabricação, têm a vantagem de ser facilmente depositados em grandes áreas. (Falcão, 2005). O silício empregado na fabricação de células fotovoltaicas é extraído do mineral quartzo. O Brasil é um dos principais produtores desse minério, mas a purificação do silício não é feita no País (Marcelo Gradella Villalva, 2015).

Fig. 9 - Cristal de quartzo



Fonte: (Wikimedia Commons, 2016)

Fig. 10 - Cristal de quartzo



Fonte: (wikipedia, 2017)

2.3.1 Silício Monocristalino (c-Si)

Estas células são as mais eficientes e também as mais caras de todas as células de silício. O crescimento do monocristal se dá a partir do silício fundido de alta pureza (Si = 9,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades extremamente lentas (da ordem de cm/hora), sendo este processo de crescimento do silício conhecido como método Czochralski (FAHRENBRUCH et al, 1983).

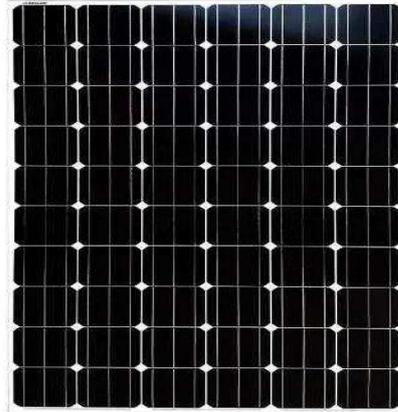
As células feitas com este material são historicamente as mais utilizadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade.

As células são formadas em fatias de único grande cristal. A grande experiência na sua fabricação e a pureza do material garante alta confiabilidade do produto e alto grau de eficiência.

Alcançam eficiência de 15% a 18%, porém com custo de produção mais elevado do que outros tipos de células.

São células frágeis e quebradiças que, para serem utilizadas tem que ser montadas em módulos o que faz com que adquiram maior resistência. (Marcelo Gradella Villalva, 2015).

Figura 11 – Célula do tipo monocristalino



Fonte: (Mercado Livre, 2017)

2.3.2 Célula de GaAs

O GaAs é um material com várias propriedades desejáveis à aplicação em células solares, tais como, energia de banda proibida próxima ao valor de 30 ideal, alto coeficiente de absorção, além da possibilidade de formação de ligas com vários materiais.

Embora as células solares de GaAs apresentem elevada eficiência, não são competitivas em termos de aplicações terrestres, devido aos altos custos envolvidos em seu processo de fabricação. Células de GaAs com área de 0,126 cm² tem apresentado eficiência de 27,6% em laboratório (KAZMERSKI, 1999).

Figura 12 - Células solares de GaAs de alta eficiência cobrindo o satélite MidSTAR-



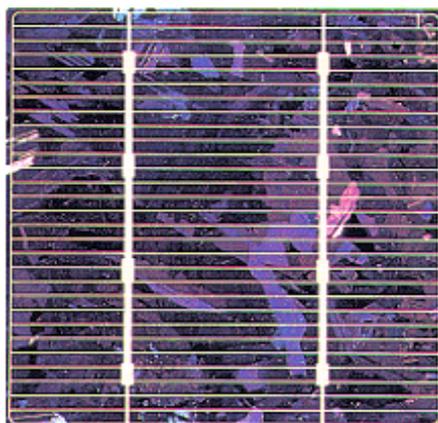
Fonte: (NASSABAY, 2009)

2.3.3 Silício (si) Policristalino

Estas células são fabricadas a partir do mesmo material que das células de silício monocristalino, todavia, ao invés de formarem um único grande cristal, este é solidificado em forma de um bloco composto de vários pequenos cristais. A partir deste bloco são obtidas as chamadas fatias e fabricadas as células. A presença de interfaces entre os vários cristais reduz um pouco a eficiência destas células. Na prática, os produtos disponíveis alcançam eficiências muito próximas das oferecidas em células monocristalinas.

As células de silício policristalinos tem eficiências comerciais de 13% e 15%, que são pequenas em relação às de silício monocristalino, contudo, por terem custo de fabricação menor, essa redução de eficiência é compensada (Marcelo Gradella Villalva, 2015).

Figura 13 - Célula de silício policristalino



Fonte: (cresesb, 2014)

2.3.4 Silício Amorfo (a-Si)

As primeiras aplicações comerciais desta tecnologia surgiram na década de 80, com módulos de área de poucos centímetros quadrados, em calculadoras portáteis. É estimado que o volume vendido das células amorfas seja maior do que o volume de células cristalinas vendidas até o momento (NASSABAY, 2011).

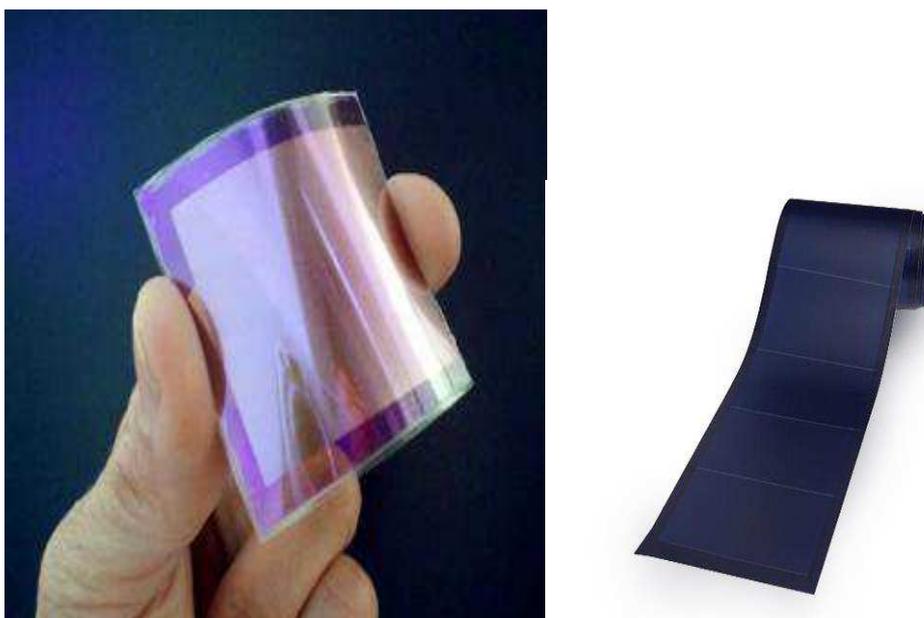
O processo de produção de silício amorfo permite que filmes finos do material sejam depositados em substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Assim, podem-se desenvolver painéis solares mais leves, mais resistentes, semitransparentes e com superfícies curvas (FALCÃO, 2005).

A maior desvantagem é a eficiência dos módulos de filme fino de silício amorfo, comparada com dispositivos cristalinos, é entre 5% e 8% e sua eficiência diminui durante os primeiros 6 a 12 meses devido à degradação induzida pela luz. (Marcelo Gradella Villalva, 2015)

Ainda se pesquisa a solução para alguns problemas encontrados com a estabilidade deste material, como o efeito Staebler-Wronski, que se refere ao aumento na densidade das imperfeições com a exposição à luz, o que causa redução na eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica.

Este efeito pode ser minimizado pela adoção de células com múltiplas camadas (CRESESB, 2004), ou pode ser revertido ao aquecer a substância a temperaturas de mais de 150°C.

Fig. 14 - Célula de silício amorfo

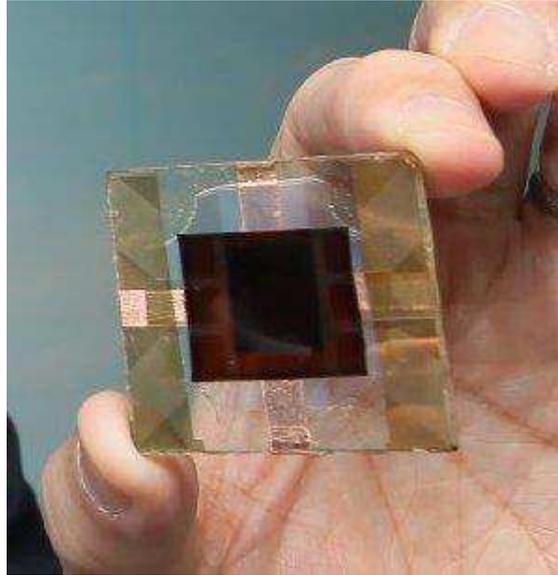


Fonte: (NASSABAY, 2011)

2.3.5 Células Híbridas

As Células Híbridas consomem pouca energia na sua fabricação, o que torna seu custo atraente. Elas produzem mais energia quando expostas a altas temperaturas, comparando-as a células solares cristalinas e resultam da combinação do filme fino com células convencionais cristalinas

Fig. 15 - Células híbridas



Fonte: (Inovação Tecnológica, 2016)

2.3.6 Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

O mais recente competidor do silício amorfo e do silício policristalino no mercado fotovoltaico para geração de energia é o CdTe, também na forma de filmes finos. Para aplicações em calculadoras o CdTe já vem sendo usado há quase uma década, mas nas chamadas aplicações terrestres, somente agora é que começam a ser comercializados painéis solares de grandes áreas.

Estes painéis, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro, também apresentam um atrativo estético em comparação ao silício policristalino. Assim como no caso do silício amorfo, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de energia elétrica.

A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção.

O recorde de eficiência de células individuais de CdTe de área 1,31 cm² em laboratório é de 16,5% (WU et al, 2001) e módulos têm apresentado eficiências superiores a 10% (MCCANDLESS et al, 2004)

Fig.16 - Amostra de telureto de cádmio



Fonte: (NASSABAY, 2011)

2.3.7 Células de disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂ ou CIS)

Outra tecnologia de célula fotovoltaica muito atrativa pela sua alta eficiência seriam os compostos de disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂), geralmente referidos pela sigla CIS. Estes possuem as mesmas características dos painéis de silício amorfo e telureto de cádmio, sendo que suas eficiências alcançadas em laboratório chegam a 19,2%.

Atualmente, a liga CuInGaSe₂ pode ser usada como alternativa ao CIS, sendo que estas duas ligas são referidas como CIGS. Estas ligas mostram-se estáveis e resistentes à radiação solar, não somente em aplicações terrestres, mas também em aplicações espaciais. (FALCÃO, 2005). Assim como o telureto de cádmio, o disseleneto de cobre e índio tem sido usado desde o final da década de 70. Sua eficiência, em condições comerciais atuais é de 15%. Seriam necessários 124 kg deste material para produzir um megawatt de potência (PARTEIN, 1995).

2.3.8 Células Poliméricas/Orgânicas

Outra classe de células solares flexíveis pode vir em diversas formas, tais como: células orgânicas (também ditas células plásticas) ou células químico-orgânicas. Esta tecnologia é relativamente nova e é intensamente pesquisada em universidades e indústrias por todo o mundo. Células poliméricas são leves, potencialmente descartáveis, e de baixo custo de fabricação. Flexíveis, e personalizáveis a nível molecular, possuem baixo potencial pra impactos ambientais negativos. As desvantagens são: a eficiência é cerca de 1/3 das células baseadas em silício, e são relativamente suscetíveis á degradação fotoquímica. Seu aspecto é mostrado na Figura 16, Nassabay, 2011

2.3.9 Células Multijunção

Uma das mais altas eficiências atingidas por células de unijunção é a de GaAs, com 28%, valor próximo do limite máximo teórico de 37%. Em geral as eficiências máximas de células de unijunção deverão ficar em torno de 30%, limitadas pelo grau de aproveitamento permissível pelo espectro solar. Sob luz monocromática de 8.500 Å, ou seja, fótons com energia de 1,45 eV, estas células desenvolvem uma tensão em seus terminais de 1,1V. Como possuem um fator de preenchimento (FF – *fill factor*) de 0,85, tem-se o seguinte rendimento:

$$\eta = FF \frac{V}{E} \Rightarrow \eta = 0,85 \frac{1,1}{1,45} = 64\% \quad (4)$$

O melhor aproveitamento do espectro solar permitirá eficiências muito superiores às atualmente obtidas. Como cada junção semicondutora tem uma banda proibida característica, e com isso picos diferentes de absorção, a combinação de mais de uma junção é uma técnica promissora para se atingirem maiores rendimentos. Cálculos teóricos impõem como limites superiores eficiências de 42,5% para células com duas junções e de 50% para três junções. No limite para um grande número de junções, equivalendo a absorções monocromáticas, a eficiência chega a 60%. A distribuição espectral do Sol e a sensibilidade humana e do silício são mostradas na Figura 2.19. Notar como a resposta do Silício é muito mais elevada na região do infravermelho.

2.4 DESCRIÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O módulo fotovoltaico é formado pela união de várias células fotovoltaicas. Cada célula possui em torno de 0,5V e, para formar o módulo devem ter as mesmas características elétricas, o que evita a diminuição da capacidade do módulo, pois as células de maior foto corrente e foto tensão dissipam a sua potência nas células de menor desempenho. Os módulos podem ser agrupados em série ou em paralelo, de acordo com a tensão e corrente necessárias. (CRESESB, 2004).

A incompatibilidade destas características leva a módulos “ruins”, porque as células de maior fotocorrente e fotovoltagem dissipam seu excesso de potência nas células de

desempenho inferior. Em consequência, a eficiência global do módulo fotovoltaico é reduzida (CRESESB, 2004).

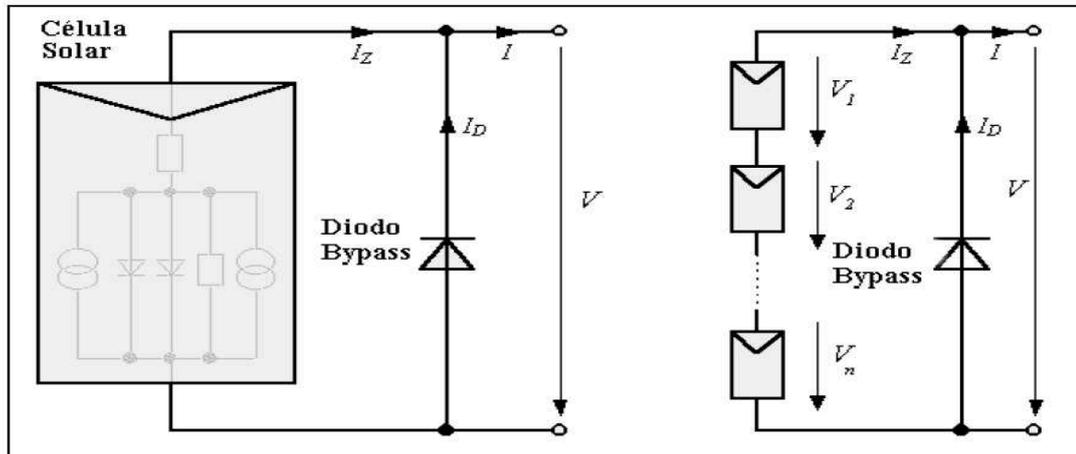
Para carregar baterias de 12 V, por exemplo, os módulos fotovoltaicos devem produzir aproximadamente 16 V devido ao efeito da temperatura e às perdas que ocorrem no sistema. (Prado, 2012). Dessa forma, os módulos atualmente em operação contêm entre 28 e 40 células de silício cristalino. O dispositivo de filme fino produz tensão mais alta do que a forma cristalina, podendo os módulos possuir menos do que 28 células (Prado, 2012).

2.4.1 Proteção das células dos módulos

Tais estruturas, por ficarem expostas às intempéries, precisam ser confiáveis para se atingir a vida útil desejada. Hoje, costumam-se encontrar garantias de 20 anos ou mais para painéis solares (Partein, 1995).

Inicialmente, as células eram postas entre duas camadas de vidro presas por cola de silicone. A cura desta cola demorava dias, além de ser um processo caro e sujo. Hoje, o silicone foi substituído por folhas de PVB (Polivinil Butiral) ou, o que é mais comum em aplicações comerciais, EVA (Etil Vinil Acetato), além de ser mais barato, de mais fácil armazenamento, causar menor esforços mecânicos nas células, ser mais permeável à umidade e mais estável do que o PVB. Nesse caso, a base de montagem de vidro foi substituída por lâminas metálicas ou de plástico, como PVF (Polifluoreto de Vinila), enquanto a cobertura exposta à luz usa vidro temperado com baixo teor de Ferro. O PVB ou EVA é curado a 150 °C, sob vácuo de 500 mTorr (66,66 Pa ou 6,8 atm). Um sistema de agitação garante que o plástico se infunda por todas as frestas. O resultado é mostrado na Figura 2.24 (Nassabay, 2011).

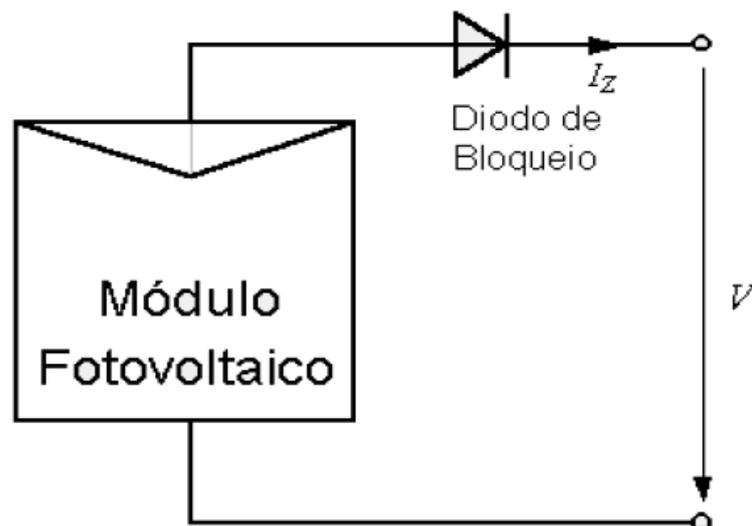
Diodo de *bypass*: Devido ao fato das células solares do módulo fotovoltaico serem ligadas em série, na ocorrência do sombreamento parcial da superfície do módulo, sua potência de saída cairá drasticamente. Para que a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (no caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passagem ou de “*bypass*” (Figura 18). Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula encoberta. (Prado, 2012)

Figura 17 - Diodo de *bypass*

(CRESESB, 2004)

Diodo de bloqueio: Outro problema que pode acontecer quando, por exemplo, um módulo fotovoltaico alimenta uma bateria, é a corrente reversa passar pelas células. Neste sistema, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais corrente do que produz. Esta corrente recebida pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode se desconectar do arranjo fotovoltaico causando a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar que isto ocorra, usa-se um diodo de bloqueio (Figura 19), para impedir que correntes reversas percorram as células no caso da ligação do módulo diretamente a uma bateria. (Prado,2012)

Figura 18 - Diodo de bloqueio



(CRESESB, 2004)

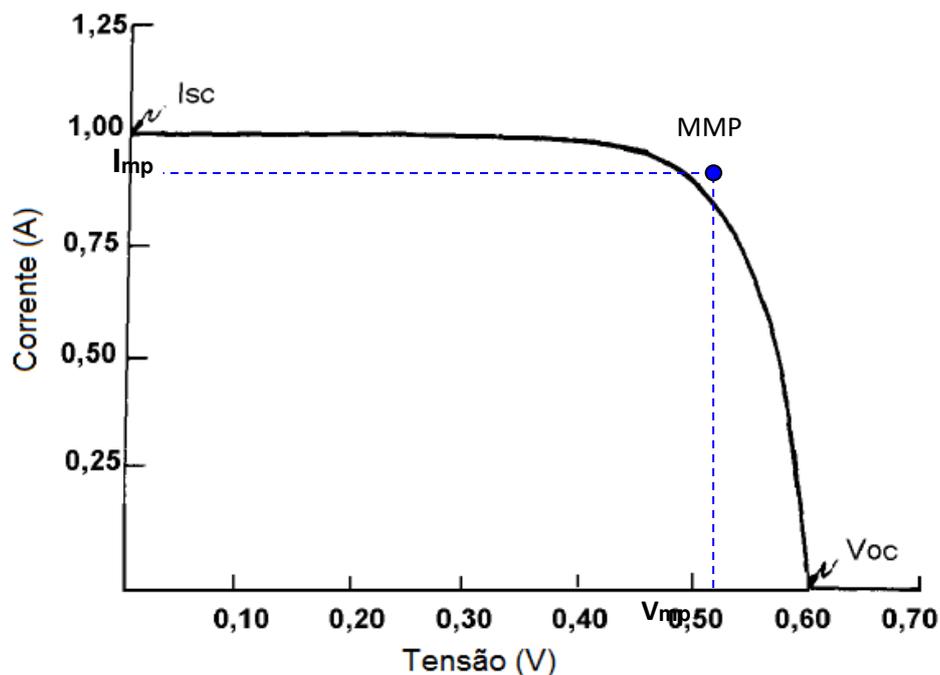
2.5 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS E MÓDULOS TCC

A escolha de um determinado módulo solar deve ser feita em função da necessidade de corrente que será suprida à carga do sistema fotovoltaico. Assim sendo, os parâmetros ou características elétricas de um módulo precisam ser entendidos para que se possa selecionar o tipo apropriado para cada sistema em particular. As principais características de um módulo fotovoltaico serão analisadas a seguir.

Tensão de circuito aberto V_{oc} e corrente de curto-circuito I_{sc} : a tensão medida entre os terminais da célula (ou do módulo fotovoltaico), no caso de não haver nenhuma carga ligada, é denominada tensão de circuito aberto (V_{oc}). Se os terminais da célula (ou do módulo fotovoltaico) forem ligados diretamente haverá a circulação de uma corrente máxima denominada corrente de curto-circuito (I_{sc}). A tensão V_{oc} correspondente é nula. Esses valores estão mostrados na Figura 20.

Curva característica corrente versus tensão ($I \times V$): de acordo com as mudanças de condições da carga, os valores de corrente e tensão medidos na saída da célula (ou módulo) podem ser representados pela curva característica $I \times V$, mostrada na Figura 20. Estas curvas são parametrizadas à intensidade da radiação e temperatura em que foram obtidas.

Figura 19 - Curva característica $I \times V$ típica de uma célula de silício

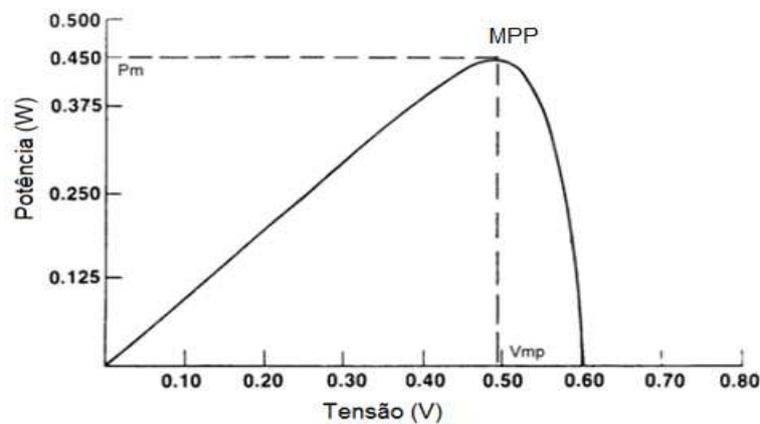


(adaptado de CRESESB, 2004)

O produto da corrente pela tensão da célula (ou do módulo fotovoltaico) em cada ponto na curva $I \times V$ da Figura 2.14 gera a curva da potência vs tensão, mostrada na Figura 2.15. Existe somente um ponto da curva onde os valores da tensão, V_{mp} , e o da corrente, I_{mp} , correspondem à potência máxima que pode ser extraída de uma célula fotovoltaica, chamado ponto de máxima potência MPP (*Maximum Power Point*).

A potência no MPP, P_{mp} , é dada pelo produto da tensão V_{mp} pela corrente I_{mp} . Os valores de MPP, V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{sc} determinam as características da célula ou painel fotovoltaico para valores específicos de radiação, temperatura de operação e massa de ar.

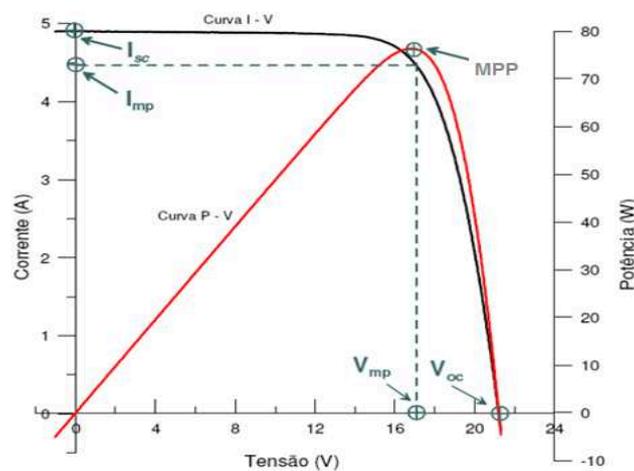
Figura 20 - Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício



(CRESESB, 2004)

A Figura 21 mostra curva característica $I \times V$ superposta à curva de potência vs tensão $P \times V$.

Figura 21 - Curvas $I \times V$ e $P \times V$ Parâmetros de potência máxima



(GASPARIN, 2009)

O fator de forma (FF) é uma grandeza que expressa quanto à curva característica I x V se aproxima de um retângulo. Quanto melhor for a qualidade das células do módulo, mais próxima da forma retangular será sua curva I x V. O fator de forma é expresso por:

$$FF = (I_{mp} \times V_{mp}) / (I_{sc} \times V_{oc}) \quad (5)$$

onde:

FF: fator de forma [adimensional];

I_{mp} : corrente do MPP [A];

V_{mp} : tensão do MPP [V];

I_{sc} : corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico [A];

V_{oc} : tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico [V].

A eficiência do painel é dada por:

$$\eta = (I_{mp} \times V_{mp}) / (A \times G) \quad (6)$$

onde:

η : eficiência do painel [adimensional];

I_{mp} : corrente do MPP [A];

V_{mp} : tensão do MPP [V];

A: área útil do módulo [m²];

G: irradiância no painel [W/m²].

(CARVALHO, 2012)

2.6 TOPOLOGIAS COMUNS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Um sistema fotovoltaico é definido como um conjunto de dispositivos destinados à conversão de energia solar em energia elétrica, sendo composto por, pelo menos, um painel fotovoltaico, pela estrutura de sustentação dos painéis, um inversor de frequência para o atendimento de cargas AC, dispositivos de proteção, e em certos casos, um sistema de armazenamento de energia, utilizando capacitores e baterias.

A tecnologia atual ainda não é competitiva comparada às formas convencionais de geração de energia, mas aplicações para esses sistemas são encontradas em ambientes rurais ou em pequenos sistemas elétricos, como repetidores de sinal de telefonia móvel.

Em conjunto com um sistema de armazenamento de energia, estes sistemas isolados são capazes de atender cargas de até algumas dezenas de quilowatts, o que torna estas opções mais atrativas do que outras opções tradicionais, como a conexão à rede ou o uso de geradores (NASSABAY, 2011).

Sistemas fotovoltaicos isolados geralmente recorrem a alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito por meio de baterias, de energia gravitacional, bombeando água em tanques de abastecimento, ou por uma forma pneumática, ou seja, de ar pressurizado. Em alguns casos esse armazenamento não é necessário, como por exemplo, na irrigação, onde toda a água bombeada é consumida diretamente ou estocada em reservatórios (TER-GAZARIAN, 1994).

Para os casos onde a energia é armazenada em baterias, um dispositivo é usado para carga e descarga da bateria. Esse controle de carga é necessário, pois evita redução na vida útil da bateria por descarga profunda ou por sobrecarga. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos de baixa tensão e corrente contínua (COSTA, 2014). Existem também sistemas de armazenamento que utilizam da tecnologia dos supercapacitores, os quais contam com uma grande vantagem em relação às baterias que é o tempo de vida útil, que nas baterias é, sob condições ideais de uso, em torno de 5 anos.

Para a alimentação de equipamentos de corrente alternada, é necessária a utilização de um inversor de tensão, que realiza a conversão a tensão DC, obtida dos painéis fotovoltaicos, em tensão AC (COSTA, 2014). Em alguns casos, geralmente em usinas solares, é utilizado em conjunto com os inversores, um sistema de seguidor de ponto de máxima potência, que tem como finalidade o aumento da produção de energia.

3 ARDUÍNO

3.1 CONCEITO DE ARDUÍNO

Arduino é um sistema de fusão de três elementos críticos: hardware, software e comunicação. De acordo com Andrew K. Dennis, Arduino é uma tecnologia de hardware aberta juntamente com uma linguagem de programação e um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) baseado no software de fiação open source.

A plataforma Arduino é um dos mais populares produtos de hardware aberto a ter atingido o mercado. Foi desenvolvido na Itália por Massimo Banzi por e David Cuartielles em 2005.

Uno é número um em italiano, nomeado para o lançamento da versão 1.0 do software Arduino. Antecessores a este tinham uma variedade de nomes, tais como Serial, NG, Diecimila (10.000 em italiano, para assinalar que 10.000 placas foram vendidas) e Duemilanove (2009 em italiano, a data de lançamento da placa). A plataforma Arduino permite ao usuário criar hardware e aplicativos que o controlam por meio de uma linguagem de programação personalizada.

Barato e fácil de usar, o Arduino é uma alternativa para cartões programáveis de alto custo e sistemas comerciais fechados.

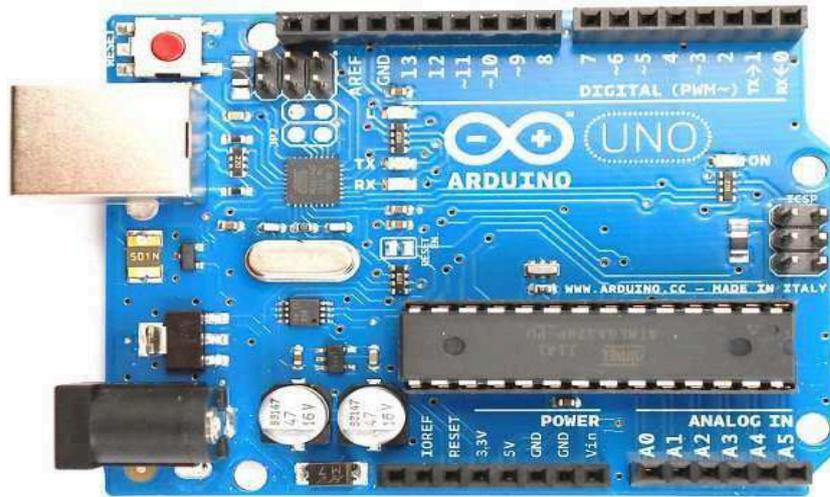
3.2 COMPONENTES DO ARDUÍNO

Um Arduino é diferente de um computador convencional, sem praticamente nenhuma memória, nenhum sistema operacional, e sem mouse ou teclado virtual. O seu objetivo é controlar sistemas por interface com sensores e atuadores. Assim, por exemplo, pode-se anexar um sensor para medir a temperatura e um relé para controlar o poder de um aquecedor.

Não existe uma placa Arduino definitiva. Muitos tipos de placas Arduino estão disponíveis, cada uma com seu próprio projeto para atender às diversas aplicações.

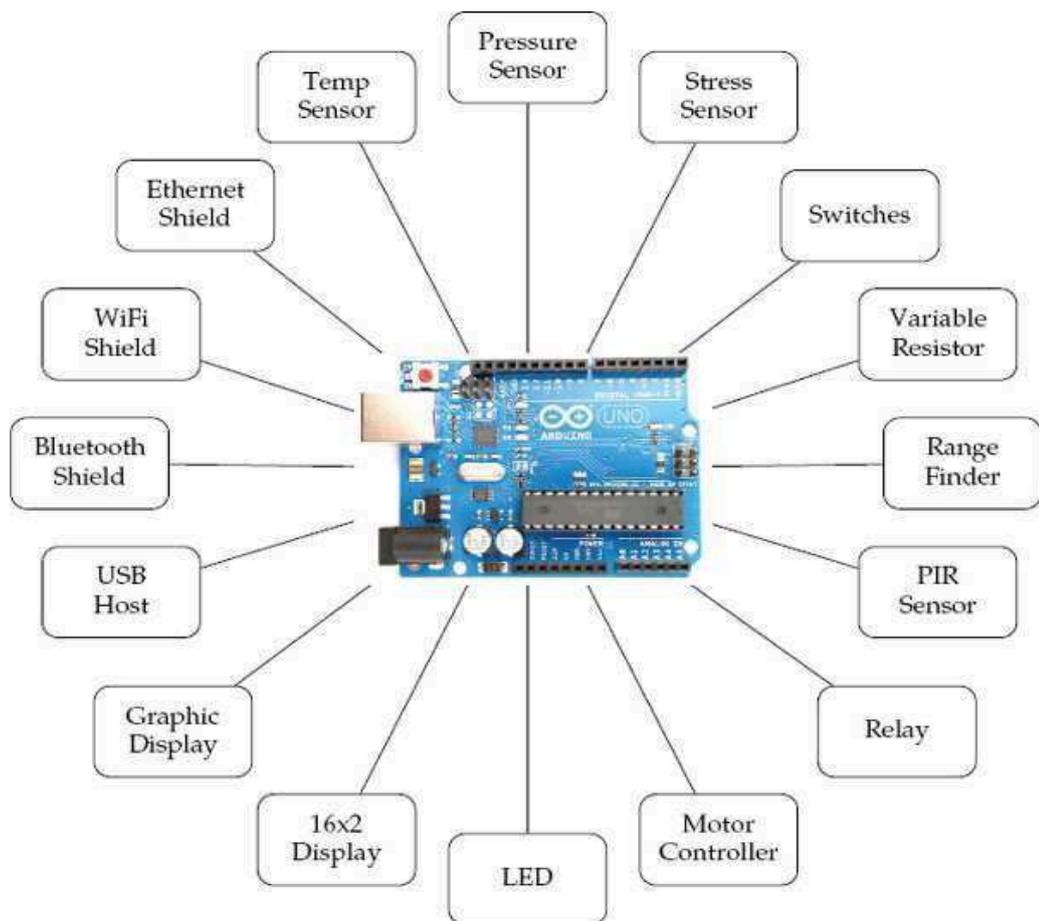
Para esse projeto foi utilizada a placa Arduino Uno, mostrada na figura abaixo, e logo a seguir, na Figura 22, são ilustrados alguns dos componentes que podem ser anexados à placa.

Figura 22 – Arduino Uno



Fonte: Monk, Simon. *Programming Arduino Next Steps Going Further with Sketches*, 2014.

Figura 23 – Interface de um arduino uno



Fonte: Monk, Simon. *Programming Arduino Next Steps going further with sketches*, 2014

3.2.1 Microcontrolador ATmega328

O microcontrolador pode ser definido como o "cérebro" do Arduino. O microcontrolador usado no Arduino Uno é o ATmega328, produzido pela Atmel. É um componente grande, da cor preta, localizado no centro da placa. Este chip é conhecido como um circuito integrado, ou IC.

Figura 24 – Microcontrolador ATmega328



Fonte: Nussey, John. Arduino For Dummies, 2013.

3.2.2 Soquete de cabeçalho

O soquete do microcontrolador liga todos os terminais do ATmega328 a outros soquetes de corrente, referido como soquete de cabeçalho. Foram inseridos em torno da placa e marcados para facilidade de utilização. São os soquetes pretos em torno da borda da placa Arduino. Estes são divididos em três grupos principais: pinos digitais, pinos de entrada analógica, e pinos de alimentação. Todos estes pinos transferem uma tensão, que pode ser enviada como saída ou recebida como entrada. Eles permitem que circuitos adicionais sejam conectados à placa de forma rápida e fácil ao criar o protótipo com uma placa de ensaio, e permitem que as placas adicionais, chamadas escudos, sejam encaixadas perfeitamente no topo da placa Arduino, sendo capazes de interpretar sinais elétricos e convertê-los em sinais digitais que o computador possa entender - e vice-versa.

3.2.3 Pinos digitais e analógicos

Os pinos digitais enviam e recebem sinais digitais. Digital significa que possuem dois estados: ligado ou desligado. Em termos elétricos, isso significaria um valor de 0 ou 5 volts, mas nenhum valor entre eles. Pinos analógicos recebem valor analógico. Um valor analógico é feito a partir de uma gama de valores. Neste caso, a gama é a mesma 0V a 5V, como nos pinos digitais, mas o valor poderá ser, em qualquer ponto, 0,1, 0,2, 0,3, e assim por diante.

3.2.4 Pinos de alimentação

Têm a função de distribuir tensão nas entradas e saídas sempre que necessário. Podem ser utilizados de uma fonte de tensão (V) igual ao fornecido pelo conector de alimentação externo (por exemplo 12V). São utilizados também para fornecer energia para o Arduino de outra fonte. GND marca os pinos de terra, essenciais para completar os circuitos. Há também um terceiro fundamento pelo pino 13. Todos são ligados e compartilham mesma trilha.

3.2.5 Soquete USB

Para o microcontrolador mandar os comandos à placa Arduino, é necessário o envio de um programa. No Uno, os programas são enviados principalmente por uma conexão USB. O soquete grande, metálico, é uma porta USB para um cabo AB USB. O Arduino usa o USB tanto para a alimentação quanto para transferir dados.

3.2.6 Conector de alimentação externo

Próximo ao soquete USB há outro soquete, este é para a alimentação e permite alimentar o Arduino a partir de uma fonte externa. O fornecimento poderá ser de um adaptador de CA-CC, uma bateria, ou até mesmo um painel solar. O conector necessário é um “plug” de centro positivo de 2,1 mm. Centro positivo significa simplesmente que o tampão tem um lado exterior e um lado interior que se ajustam ao soquete e que, neste caso, o interior do tampão deve ser positivo. Normalmente encontra-se este “plug” entre os conectores padrões que vêm com a maioria das fontes de alimentação. Conectando-se uma fonte de alimentação que é o oposto (centro negativo), ocorrerá uma "inversão de polaridade."

Há componentes no Arduino Uno para resistir às tentativas de enviar tensão de forma errada em torno da placa, mas os componentes podem derreter no progresso da economia da placa, dependendo de quanta energia estará sendo enviada. A tensão recomendada para a placa Uno é 7-12 V. Se houver fornecimento menor, a placa poderá não funcionar corretamente, ou, se houver um fornecimento de energia maior, a placa se superaquecerá e sofrerá danos.

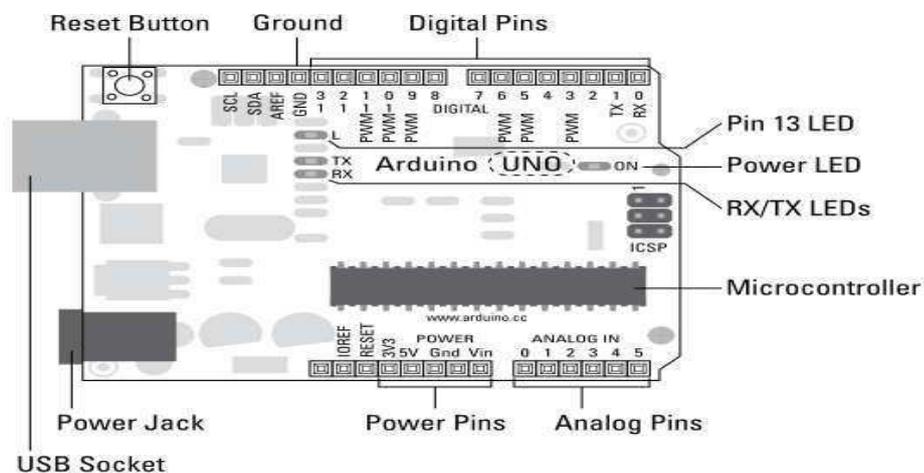
3.2.7 Botão de Reset

A placa Uno contém um botão próximo ao soquete USB, chamado de reset, que redefine o programa no Arduino ou faz com que pare completamente quando pressionado por um tempo.

3.2.8 LEDs

A placa Uno tem quatro diodos emissores de luz (LEDs), designados por L, RX, TX, e ON. Um diodo emissor de luz é componente que produz luz quando a corrente elétrica flui por dele. Usufri de uma variedade de formas e tamanhos e é encontrado em quase todos os eletrônicos atuais, desde TVs até máquinas de lavar. Eles são quase inevitáveis, são o futuro. Estes quatro LEDs são usados para indicar a atividade na placa, como se segue: **ON** é verde e significa que o Arduino está sendo alimentado; **RX e TX** significa que os dados estão sendo recebidos ou transmitidos para a placa; **L** é um LED muito especial que está ligado ao pino digital 13. É uma forma de verificação do funcionamento adequado da placa.

Figura 25 – Indicação das partes importantes do Arduino Uno



Fonte: (Nussey, John. *Arduino For Dummies*, 2013.)

3.2.9 Interfaces de programação

Normalmente, os programas dos microcontroladores ATmega são escritos em C++ ou Assembly e programados por meio da interface ICSP, usando um programador específico ou via USB.

O software utilizado para a digitação da programação do Arduino é o IDC (Integrated Development Environment). Ele contém um editor de texto para escrever código, uma área de mensagens, um console de texto, uma barra de ferramentas com botões para funções comuns e uma série de menus. Ele se conecta ao hardware Arduino para carregar programas e para se comunicar.

A programação para a placa Arduino nesse projeto foi realizada em C++.

3.2.10 Programando o arduino

Um programa de computador é uma série codificada de instruções que informa ao computador o que fazer. Os programas que são executados no Arduino são chamados de *sketches*.

Um programa Arduino tem duas partes: `setup ()` e `loop ()`.

- A função `setup ()` diz ao Arduino o que ele precisa saber a fim de fazer o que queremos que ele faça. Por exemplo, a função `setup ()` diz ao Arduino os pinos que necessitam ser configurados como entrada e saída. Se precisar usar um tipo especial de saída para mostrar os resultados, tais como uma exibição de quatro caracteres, o `setup ()` irá dizer como essa saída funcionará. Se precisarmos nos comunicar com o mundo exterior por uma porta serial ou uma conexão Ethernet, todas as instruções necessárias para fazer essa ligação passarão por aqui.
- A função `loop ()` diz ao Arduino o que fazer com a entrada ou saída. Ao contrário de alguns outros computadores, ele nunca para; uma vez que as instruções em um loop são executadas, o Arduino voltará para o topo do `loop ()` e passa a executar instruções novamente.

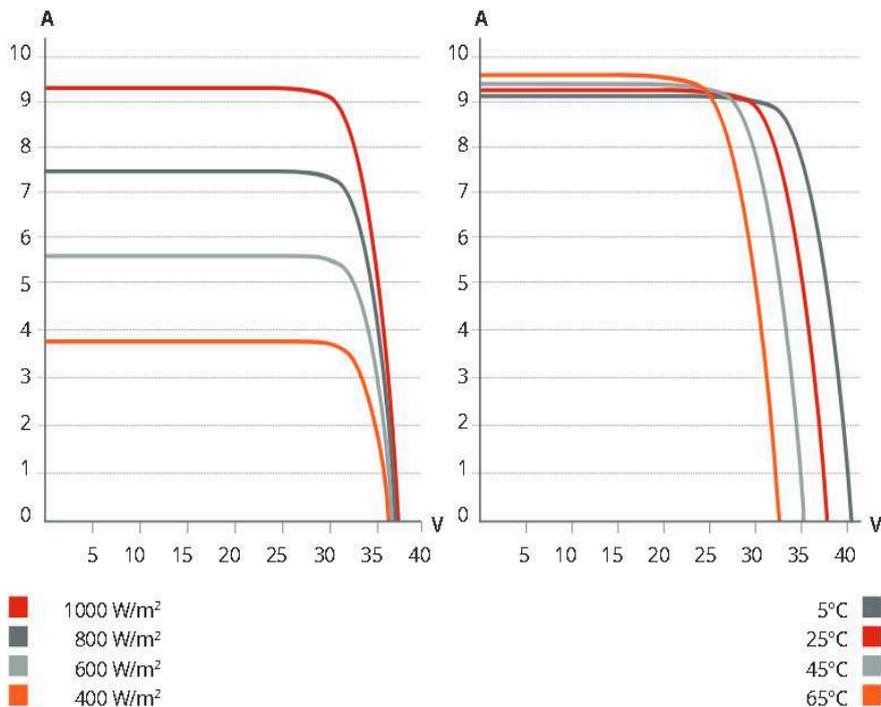
4 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CARGAS PONTUAIS.

O trabalho proposto visa à alimentação de refrigeradores por meio da energia solar fotovoltaica. O sistema proposto é uma chave seccionadora que irá atuar hora ligando o aparelho no sistema solar quando houver irradiação solar suficiente para suprir a carga, e, quando insolação solar for baixa, irá mesclar para rede com um tempo morto que evitará que haja repique diminuindo a vida útil do motor e do compressor. Para a utilização deste sistema recomenda-se a utilização de motores com partida soft-start (partida suave), assim a corrente de partida será suavizada e reduzirá o nível de estresse do inversor.

4.1 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Princípio de funcionamento do circuito: O painel solar possui uma curva de funcionamento conforme mostrado na figura:

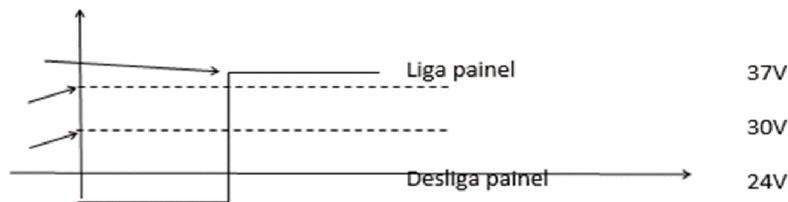
Figura 26 - Curva de Funcionamento do Painel Solar



Fonte: (CANADIANSOLAR, 2017)

Ao observarmos as curvas, o painel em aberto possui voltagem de 37,2, em funcionamento normal possui a voltagem de 30v, ao diminuir a insolação o painel apresenta queda de rendimento passando a ter voltagens menores que 24v. Então estipulamos uma janela de funcionamento para o dispositivo de tensões. Tensões acima de 30v ligam o painel a carga, e tensões menores que 24v ligam a carga a rede.

Figura 27 – Funcionamento do painel em aberto



Fonte: (AUTORA, 2017)

Projeto do circuito: utilizamos um Arduino, ao qual é conectado em uma de suas entradas analógicas, um divisor de tensão calculado para que a saída de tensão máxima do nó não seja superior a 5v. Em conjunto com o divisor foi colocado um diodo zener, para garantir que a tensão não exceda os 5v. Em caso de alguma anormalidade, foram colocados nas saídas do Arduino dois relês com seus respectivos drivers para o acionamento da carga. O programa: inicialmente estipulamos as entradas e saídas, quando o programa começa a rodar o processador lê a entrada analógica, efetua a leitura 16 vezes e armazena em uma variável o resultado. Esse valor é dividido pelo número de leituras efetuadas realizando a média. Na próxima etapa o programa efetua a comparação dos valores, se for 30V desliga momentaneamente a carga e aciona o painel religando em seguida a carga, se o valor for menor que 24V o circuito retira a carga da linha, aciona a rede elétrica e recoloca a carga na linha novamente. O ciclo é repetido indefinidamente enquanto houver alimentação do circuito.

Calculo do divisor de tensão:

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} \quad (6)$$

$$5V = \frac{5,6K}{R_1 + 5,6K} * 37,5V \quad (7)$$

$$\frac{5V}{37,5V} = \frac{5,6K}{R_1 + 5,6K} \quad (8)$$

$$0,133 = \frac{5,6K}{R_1 + 5,6K} \quad (9)$$

$$R_1 + 5,6K = \frac{5,6K}{0,133} \quad (10)$$

$$R_1 = 42,1052 - 5,6K$$

$$R_1 = 36,5K \quad (11)$$

Valor comercial mais próximo 36K

Cálculo dos valores de escalonamento: tendo em vista que os valores do conversor AD do Arduino são representações dos valores analógicos verdadeiros, deve-se fazer um escalonamento para descobrir os valores nos quais o programa vai atuar:

$$\begin{array}{l} 37,5 \text{-----} 1024 \\ 30 \text{-----} X \end{array} \quad (12)$$

$$\frac{1024 * 30}{37,5} = 819,2 \text{ aproximando} = 819 \quad (13)$$

Valor Superior 819

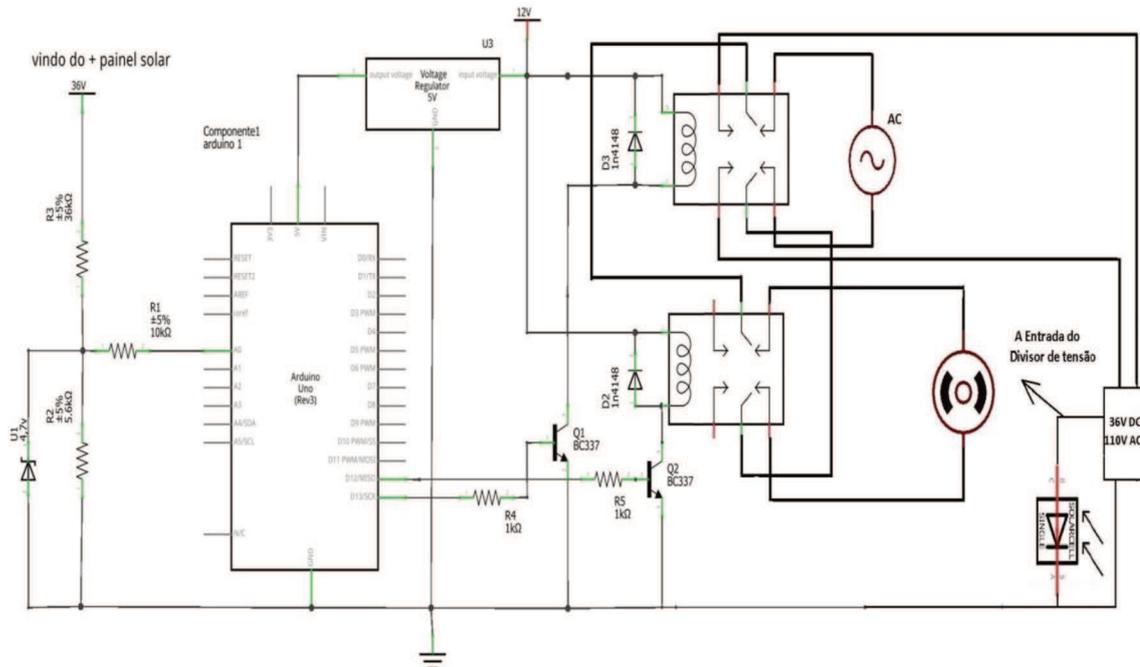
$$\begin{array}{l} 37,5 \text{-----} 1024 \\ 24 \text{-----} X \end{array} \quad (14)$$

$$\frac{1024 * 24}{37,5} = 655,36 \text{ aproximando} = 655 \quad (15)$$

Valor inferior 655

4.2 PROGRAMA PAINEL SOLAR

Figura 28 - Topologia do regulador de tensão para a alimentação dos subsistemas.



Fonte: (AUTORA, 2017)

4.3 INVERSOR

Uma geladeira residencial requer atualmente uma potência ($P_{geladeira}$) de 1/3HP, ou seja, aproximadamente 250W. Supondo que esta seja alimentada à tensão ($V_{sistema}$) de 127V rms (AC) e fator de potência F_p de 0,8 pode-se calcular a corrente I solicitada:

$$I = \frac{S_{geladeira}}{V_{sistema}} = \frac{\frac{P_{geladeira}}{F_p}}{V_{sistema}} = \frac{\frac{250}{0,8}}{127} = 2,461A \quad (16)$$

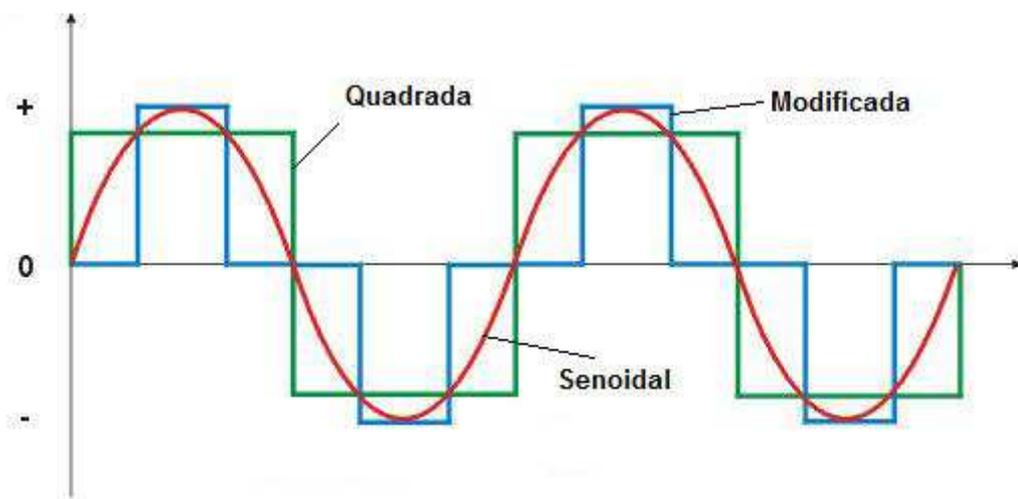
Figura 29 - Inversor de Tensão Hayonik 800W 24V para 127V Transformador Conversor Multiuso Onda Modificada



Fonte: (CONNECTPARTS, 2017)

Foi utilizado o inversor fig. 29 no projeto, pois o inversor deve suportar a potência total da geladeira que é de 250 W, off – grid pois trabalhará fora da rede e onda senoidal modificada, pois são equipamentos de baixo custo e em aparelhos eletrodomésticos que não são sensíveis a distorção de tensão operam normalmente. Valor desse inversor é de R\$ 359,90.

Figura 30 - Onda senoidal pura, modificada e quadrada.



FONTE: (SOLCENTRAL, 31/10/2017)

4.4 DETERMINAÇÃO DE CARGA DE PAINÉIS SOLARES

Para que seja determinada a potência dos painéis é necessário conhecer a potência da carga e a eficiência do inversor de tensão. Para que fosse facilitada a escolha dos módulos, neste trabalho foi construída uma planilha do Excel na qual entra-se com a potência do motor, uma margem de segurança e a eficácia do sistema de conversão.

A planilha realiza o seguinte algoritmo:

$$P_m = 745,7 * P_h \quad (17)$$

$$P_n = P_m * (1 + (s/100)) \quad (18)$$

Onde:

P_h → Potência em *Horsepower*

P_m → Potência do motor [W]

s → Margem de segurança

P_n → Potência necessária [W]

A equação (3.4) calcula a potência mínima, em Watt pico (Wp), dos painéis, levando-se em conta as perdas de conversão.

$$P_f = P_{mo} * \eta \quad (19)$$

Onde:

P_{mo} → Potência do módulo fotovoltaico [Wp]

η → eficiência do sistema de conversão (Inversor de tensão)

P_f → Potência fornecida [W]

Para garantir o funcionamento do sistema, ele deve atender a seguinte inequação (20).

$$P_f > P_m \quad (20)$$

O inversor, estiver em estado de corte não conduz energia, portanto essa energia produzida não será aproveitada, diminuindo assim sua eficiência.

Apenas para fins de exemplo foi computado na tabela os seguintes valores:

$P_h = 1/3(\text{HP})$ (valor usual do motor de geladeira);

$s = 90(\%)$;

$\eta = 50(\%)$;

A Figura 31 mostra a tabela com o resultado para os valores acima. Para a alimentação da carga foram selecionados 2 painéis de 255Wp, totalizando 510Wp, que, considerando a eficácia do sistema de conversão em 50%, conseguem suprir a demanda da carga.

Figura 31 - Quadro com o resultado para os dados exemplificados.

Potência do Motor[HP]
1/3
Margem de Segurança[%]
90
Potência necessária[Wp]
468
Potência do módulo fotovoltaico(Wp)
510
Eficiência do sistema de conversão[%]
50
Potência fornecida[W]
255
Eficiência do Sistema
O valor é suficiente.

Fonte: (Landroni, 2016)

Vale ressaltar que a potência fornecida de 255W será somente com a máxima incidência solar, durante um curto período de tempo, que no Brasil está em torno de 5 horas, por isso faz-se necessária maior relação de potência produzida e consumida pela carga. O tempo de operação do sistema também pode ser alterado aumentando o número de painéis para compensar menor incidência de luz.

Para esta finalidade, foram selecionados 2 painéis de 255Wp da Canadian. Juntos os painéis irão ocupar 3,2m² e produzirão 510W de potência. Os painéis têm custo hoje de R\$ 1.698,00.

Fig. 32 – Quadro com dados comerciais dos painéis.

Identificação	Dimensão	Potência[Wp]	Preço	Custo R\$/Wp	Área(m ²)	Eficiência(W/m ²)
Painel Solar Fotovoltaico 260Wp - Canadian CSI CS6P-260P	1638x982x40 mm	260	R\$ 1.069,00	R\$ 4,11	1,609	162
Painel Solar Fotovoltaico Canadian CSI CS6P-255P (255Wp)	1638x982x40 mm	255	R\$ 849,00	R\$ 3,33	1,609	159
Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL250P 29b (250Wp)	1650x990x35 mm	250	R\$ 1.069,00	R\$ 4,28	1,634	153
Painel Solar Fotovoltaico 150Wp - Yingli Solar YL150P-17b	1470x680x25 mm	150	R\$ 649,00	R\$ 4,33	1,000	150
Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL095P-17b 2/3 (95Wp)	1010x660x25 mm	95	R\$ 469,00	R\$ 4,94	0,667	143
Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL055P-17b 2/5 (55Wp)	660x630x25 mm	55	R\$ 229,00	R\$ 4,16	0,416	132
Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL020P-17b-1/6 (20Wp)	525x350x25 mm	20	R\$ 126,65	R\$ 6,33	0,184	109
Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL010P-17b-1/12 (10Wp)	350x305x25 mm	10	R\$ 75,65	R\$ 4,94	0,107	94

Fonte: Neosolar

Fonte: (Neosolar, 2017)

Figura 34 – Quadro com cálculo do tempo de amortização do investimento

Potência da carga[HP]	
1/3	
Preço dos painéis (R\$)	
R\$	1.698,00
Tempo de médio de luz(Mapa Solarimétrico)	
6	
Preço KW/h	
R\$	0,50
Tempo para pagamento do sistema(em Anos)	
6,2	

Fonte: (Landroni, 2016)

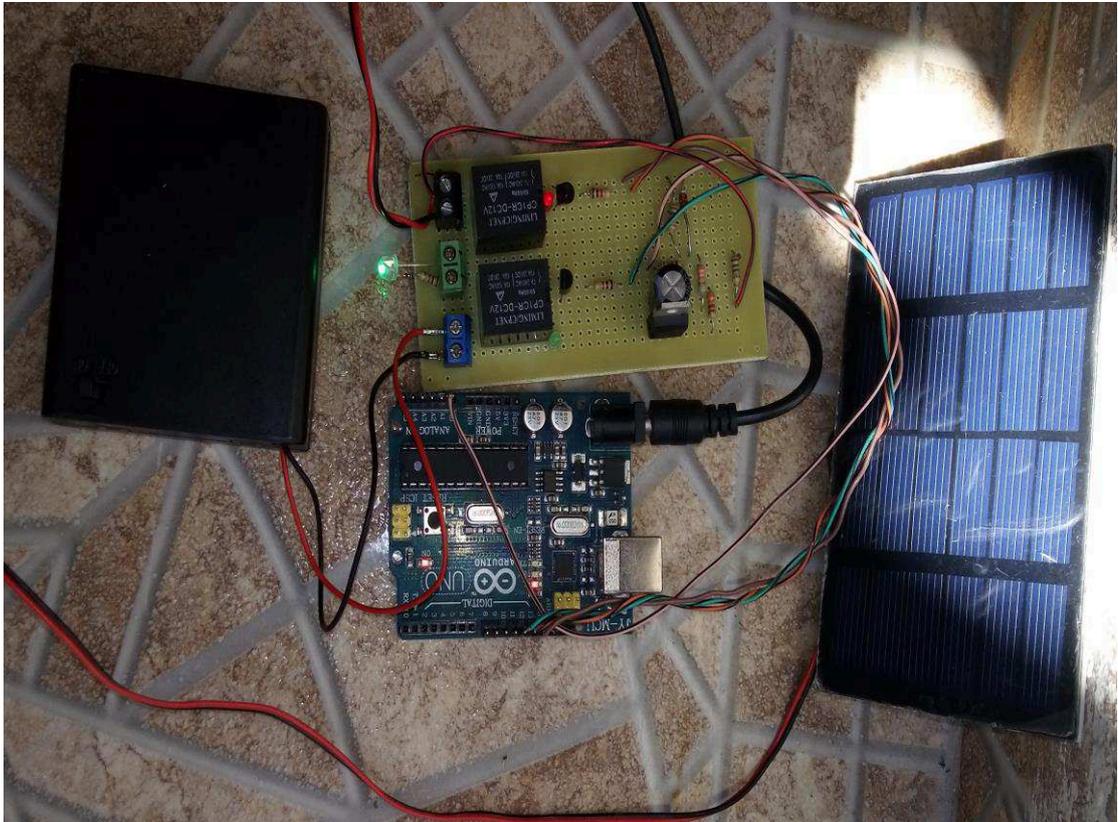
Para esse investimento, levará aproximadamente 6,2 anos para que se obtenha retorno do capital. Esse valor pode reduzir, já que o cálculo não levou em consideração as correções tarifárias.

5. SIMULAÇÃO

Após o projeto foram realizadas simulações utilizando UnoArduSim v1.6.1. Notou-se que, na curva de tensão versus corrente típica de um painel solar, desde que a corrente de saída se mantenha abaixo da corrente de máxima potência, há pouca variação na tensão de saída do painel, o que permite considerar que o painel fotovoltaico se comporta como uma fonte de tensão DC com baixa resistência interna, durante este intervalo da curva. Assim, deve-se também considerar que o painel na simulação possui potência nominal superior ou igual à consumida pela carga alimentada pelo sistema.

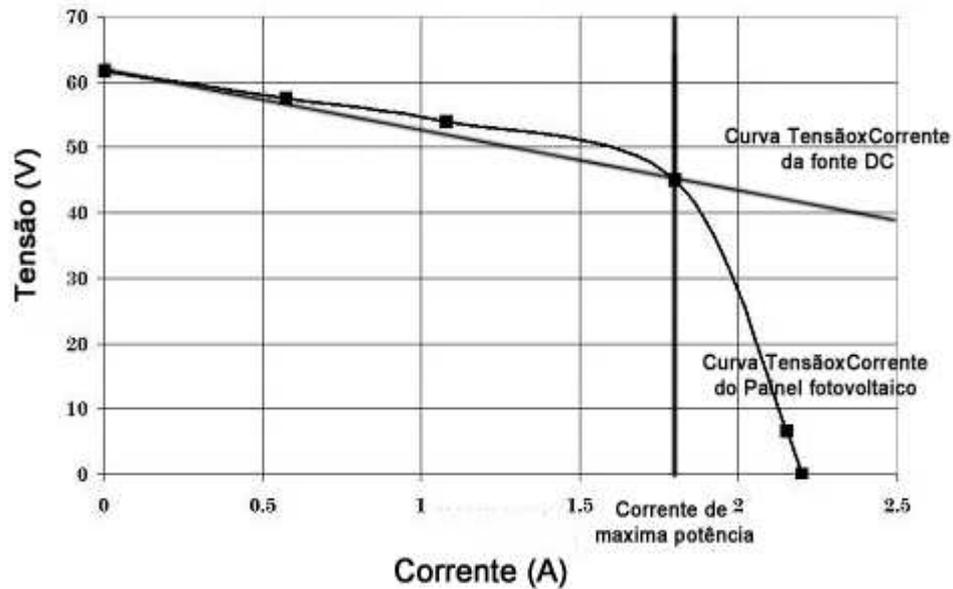
A Figura 35 mostra a curva típica de tensão versus corrente de um painel fotovoltaico, superposta à curva de tensão de uma fonte DC com baixa resistência interna, demonstrando a similaridade entre as curvas no intervalo onde a corrente de saída é inferior à corrente de máxima potência do painel (COSTA,2014).

Figura 35 - Simulação do funcionamento do circuito



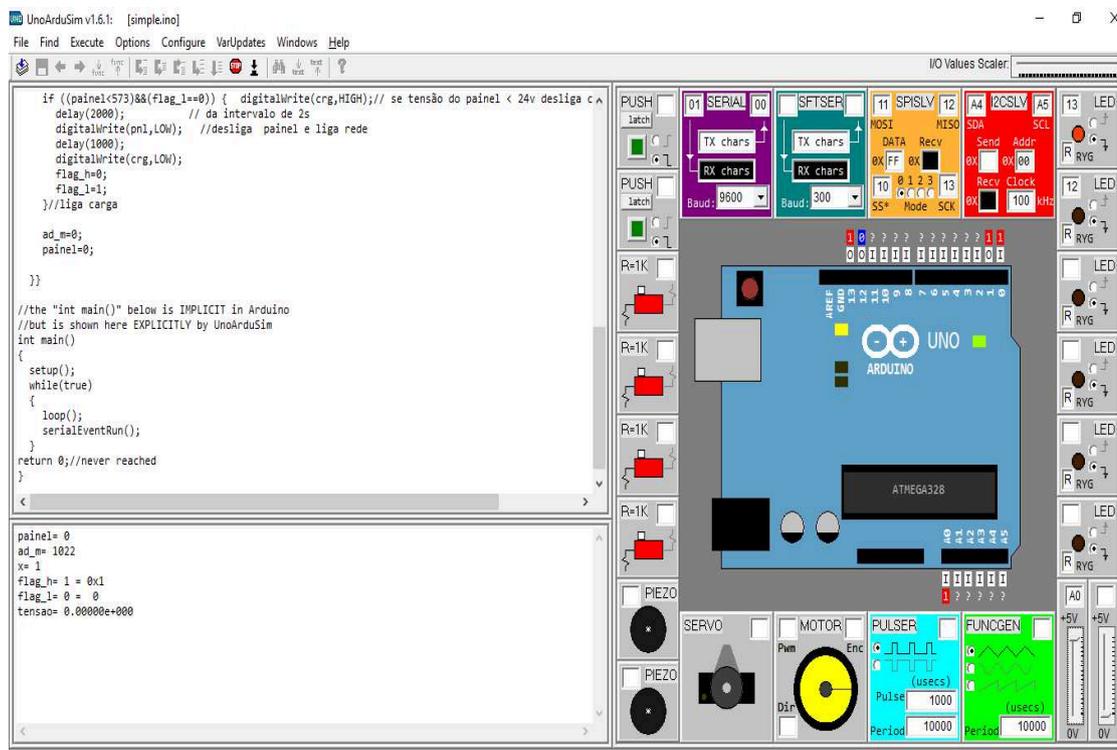
Fonte:(AUTORA, 2017)

Figura 36 - Curva de tensão versus corrente de um painel fotovoltaico superposta à curva de tensão de uma fonte DC.



Fonte: (COSTA, 2014)

Figura 37 - Simulador UnoArduSim



Fonte: (AUTORA, 2017)

Tabela 1 – Parâmetros do painel CS6P-255

Potência máxima (Wp)	255
Tensão de potência máxima (V)	30,2
Corrente de potência máxima (A)	8,43
Tensão de circuito aberto (V)	37,4

Fonte: (CANADIAN, 2016)

Segundo (COSTA, 2014), o cálculo da resistência interna do painel fotovoltaico dá-se por:

$$R_{int} = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (22)$$

Portanto a resistência dos painéis será:

$$R_{painel} = \frac{37,4 - 30,2}{8,43} \rightarrow R_{painel} = 854,09m\Omega \quad (23)$$

Como os painéis trabalham em paralelo, sua resistência total é de:

$$R_T = 427,04\Omega \quad (24)$$

Neste projeto necessita-se que a tensão fornecida seja de 30V, ou seja, os painéis terão de ser conectados em paralelo para que haja ganho de corrente e a potência final seja atingida.

6 CONCLUSÃO

A realização do presente trabalho permitiu a aquisição de conhecimentos sobre a geração de energia fotovoltaica, possibilitando-se a verificação da contrastante diferença entre rendimento das diversas tecnologias de células fotovoltaicas. Painéis com células de silício monocristalino possuem um alto rendimento e são recomendados para onde o quesito área é um ponto chave, porém quando o principal quesito for custo, recomendam-se painéis com células de silício policristalino ou silício amorfo.

Foi apresentado um sistema de alimentação de cargas que não sofrem com a interrupção temporária de alimentação, podendo-se utilizar um sistema de energia solar, disponível somente durante um período do dia, sem o uso de elementos armazenadores. Foi proposto um estudo sobre os painéis, sua viabilidade econômica, um inversor, sistema comutador através do arduino uno.

O sistema mostrou-se de baixo custo e viável para empregabilidade em residências para alimentação de cargas pontuais, visto que seu investimento pode ser amortizado em um período reduzido apenas com a economia de energia, embora possa ser utilizado em sistemas maiores, uma vez que a utilização de fontes alternativas de energias, que em geral não estão ativas continuamente, como a eólica e fotovoltaica, necessitam de sistemas de armazenamento, que encarecem o sistema e ainda requerem sincronismos com o sinal da rede pública de energia.

O projeto pode ser futuramente adaptado para atender diversas demandas, adaptando-se o inversor e alterando o dimensionamento dos componentes utilizados, de forma que se adequem à nova carga.

Sugestão para trabalhos futuros seria colocar um software preditivo, a análise preditiva é o uso de dados, algoritmos estatísticos e técnicas de machine learning para identificar a probabilidade de resultados futuros com base em dados históricos, portanto poderíamos programar para que depois de x comutações em um espaço de tempo o sistema desse um intervalo de tempo até voltar a comutar novamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, 2017. Ranking das Tarifas. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em 30/10/2017.

CARVALHO, 2012. CARVALHO, E. P. Uma nova abordagem no rastreamento de ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos. 2012. 138f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Taubaté. Taubaté, 2012.

COSTA, 2014. COSTA, R. F. Chaveamento de cargas intermitentes usando sensor de corrente. 2014. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

CRESESB, 2004. CRESESB (Org.). Tutorial de Energia Solar – Princípios e Aplicações. CRESESB, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_solar>. Acesso em 16/08/2017.

CRESESB, 2014. CRESESB (Org.). Efeito fotovoltaico, 2008. Disponível em: <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=321>. Acesso em 14/08/2017.

EDISCIPLINAS, 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf>. Acesso em 14/08/2017.

ELERT, 1998. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/119376/Ana_Paula%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 14/08/2017.

FAHRENBRUCH, M. B., BUBE, R. H. Fundamentals of solar cells. New York, Academic Press, 1983.

FALCÃO, V. D. Fabricação de células solares de CDS/CDTE. 2005. 120f. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.
FROMHOLD, 1991. FROMHOLD, A. T. Quantum Mechanics for Applied Physics and Engineering. Courier Dover Publications, 1991. 448f.

GASPARIN, 2009. GASPARIN, Fabiano Perin. Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. 2009. 58f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GAZETA, 2006. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Acesso em 14/08/2017.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2017. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celula-solar-hibrida-bate-recorde-25-5-eficiencia#.Wduy7mhSzIU>>. Acesso em 09/10/2017.

LANDRONI, R.J.R., 2016. UTILIZAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA ALIMENTAÇÃO DE CARGAS INTERMITENTES. 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrônica. Universidade de Taubaté, Taubaté, 2016.

MCCANDLESS et al, 2004. MCCANDLESS, B.E., DOBSON, K. D. Processing options for CdTe thin film solar cells. Solar Energy 77, 2004. 839-856.

MERCADO LIVRE, 2017. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-719954510-painel-placa-celula-solar-fotovoltaica-monocristalina-240w-_JM>. Acesso em 16/8/2017.

NASSABAY, 2011. NASSABAY, A. Geração de Energia Fotovoltaica Para Cargas Pontuais em Residências. 2011. 92f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

PERIÓDICOS, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6896/7584>>. Acesso em 14/08/2017

SAS, 2017. Disponível em: <https://www.sas.com/pt_br/insights/analytics/analise-preditiva.html#> Acesso em 13/11/2017.

SERWAY, 1990. Disponível em: <https://issuu.com/cengagebrasil/docs/9788522116362_livreto>. Acesso em 14/08/2017.

SOLAR, 2006. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Acesso em 14/08/2017
SOLCENTRAL, 2017. Disponível em: <<http://www.solcentral.com.br/produtos>>. Acesso em 30/10/2017.

Valadares, E. C. et al, 2001. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6896/7584>>. Acesso em 14/08/2017.

VILLALVA, M. G. Villalva, 2015. Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e aplicações Marcelo Gradella Villalva, 2015.

WIKIMEDIAS Commons, 2016. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/Quartz>>. Acesso em 16/08/2017.

WIKIPÉDIA, 2017. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Sil%C3%ADcio>>. Acesso em 16/08/2017.

ANEXO A - Programa em Arduino Uno

PROGRAMA PAINEL SOLAR

```
int painel;

int ad_m;

int x;

const int pnl=13;

const int crg=12;

boolean flag_h;

boolean flag_l;

float tensao;

void setup() {

    pinMode(pnl,OUTPUT);// define pino 13 como saida

    pinMode(crg,OUTPUT);// define pino 12 como saida

}

void loop() {

    ad_m=0;//inicializa variavel ad_m

    painel=0;//inicializa variavel painel

    flag_h=0;

    flag_l=0;

    Serial.begin(9600);
```

```

while(true){
  for (x=0;x<15;x++){
    ad_m=ad_m+analogRead(A0);
  }// efetua 16 leituras da entrada analogica

  painel=(ad_m/16); // efetua a media das leituras

  if ((painel>853) && (flag_h==0)){ digitalWrite(crg,HIGH);// se tensão do painel > 30v
  desliga carga

  delay(2000);      // da intervalo de 2s

  digitalWrite(pnl,HIGH);//liga painel

  delay(1000);

  digitalWrite(crg,LOW);// liga carga

  flag_h=1;

  flag_l=0;

  }

  if ((painel<573)&&(flag_l==0)) { digitalWrite(crg,HIGH);// se tensão do painel < 24v
  desliga carga

  delay(2000);      // da intervalo de 2s

  digitalWrite(pnl,LOW); //desliga painel e liga rede

  delay(1000);

  digitalWrite(crg,LOW);

  flag_h=0;

  flag_l=1;

  }//liga carga

  ad_m=0;

  painel=0;

```

}}