

Painéis fotovoltaicos: possibilidades de melhoria em sua eficiência

Leandro da Silva Nicácio
Engenheiro Eletricista pelo Centro Universitário CESMAC.
e-mail: leandro_nicacio@hotmail.com

Sérgio Silva de Carvalho
Mestre em Ciência da Computação pela UFPE.
e-mail: ssc1511@gmail.com

RESUMO

O aumento da demanda energética mundial juntamente com as previsões pessimistas da comunidade científica com relação às questões ambientais e a escassez de petróleo nas próximas décadas, tem levado a novas pesquisas visando intensificar o uso das fontes de energias renováveis. O surgimento de novas tecnologias e métodos é uma consequência natural da procura por resposta a seguinte pergunta: seriam as fontes de energias renováveis capazes de suprir o consumo crescente da humanidade por energia elétrica? Analisando este aspecto, este estudo tem por objetivo propor uma revisão teórica de conceitos sobre a movimentação do sol, e consequente incidência da luz solar, para desenvolvimento de projetos de sistemas de posicionamento de painéis fotovoltaicos utilizando microcontroladores. Seus movimentos tendem a corrigir constantemente sua inclinação em relação aos raios solares ao longo do dia, permitindo sempre a incidência perpendicular destes raios, portando permitindo a maior insolação possível sobre o painel.

Palavras-chave: Sistema de posicionamento. Painéis fotovoltaicos. Microcontroladores.

INTRODUÇÃO

A necessidade crescente de energia pela sociedade tem impelido pesquisas em novas formas de se obter energia. Desde a antiguidade a energia inicial provida pelos músculos humanos não é capaz de realizar todo trabalho para suprir suas necessidades. Para resolver este problema a humanidade passou a utilizar outras formas de energia a fim de complementar e posteriormente substituir seu esforço físico tais como: o uso animais de tração, o aproveitamento dos ventos e também da energia potencial contida em rios.

Com a Revolução Industrial iniciada na Inglaterra do século XVIII e expandida para o mundo no século XIX, constituiu se em um conjunto de mudanças tecnológicas com um profundo impacto no processo produtivo em nível econômico e social (SOUSA, 2009). Essas mudanças foram ainda mais intensificadas com a descoberta do petróleo que possui uma grande capacidade energética química acumulada durante seu tempo de deposição e decomposição podendo ser transformada em energia térmica realizando trabalho através de sua queima.

Com sua descoberta, o entusiasmo gerado por essa nova forma de energia impulsionou a extração em massa desse recurso, porém, logo se compreende que tal energia um dia se esgotaria.

Estudos recentes revelaram também outro fator importante a ser considerado: o efeito estufa, que desestabiliza o equilíbrio energético no planeta e origina o fenômeno conhecido como aquecimento global, intensificado pela liberação em maior parte por hidrocarbonetos na atmosfera a partir da queima de combustíveis fósseis.

A procura por novas formas de energia não poluentes e renováveis levou a descoberta do efeito fotovoltaico pelo físico experimental francês Edimund Becquerel em 1839 e posteriormente ao advento da tecnologia das células fotovoltaicas. Historicamente existiram dois fatores que impulsionaram à descoberta e o avanço desta tecnologia, primeiro por empresas de telecomunicações, como a Bell Labs, que estudavam soluções para substituir baterias elétricas que mantinham em funcionamento redes telefônicas remotas. Em segundo lugar, porém tão importante quanto o primeiro, foi a “corrida espacial”, em 1858 com a primeira utilização de células fotovoltaicas no satélite Vanguard 1 e em seguida no Explorer 1. Em 1983 a produção fotovoltaica mundial ultrapassou 9,3 Mega Watts (MW) e desde então não tem parado de crescer.

A tecnologia atual possibilita apenas 15%, em média e máxima de 30% da conversão de fótons em energia elétrica (VALLÊRA, 2006).

Sendo a maioria das aplicações em painéis fixos, na medida em que os raios solares mudam o ângulo de incidência, com o passar do dia, ou mesmo com a mudança das estações do ano, têm-se uma perda significativa na conversão de energia fotovoltaica. É sabido que a melhor conversão de energia se dá quando existe uma perpendicularidade dos raios solares com a superfície do painel solar.

Por tanto, este estudo visa o posicionamento de painéis fotovoltaicos de forma automatizada, o que permite uma melhora na absorção da energia solar e na eficiência de painéis fotovoltaicos.

1 - ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia gerada pelo sol e que chega até nosso planeta é uma das muitas formas de energia aproveitáveis pelo homem, mas, sem dúvida ocupa uma das primeiras posições em prospecção de crescimento a nível mundial, em se tratando de potencial energético pode ser coletada basicamente de duas maneiras; absorção fototérmica e fotovoltaica. Este trabalho não tratará da absorção fototérmica, mas é fato que possui muitas aplicabilidades.

A Figura 1 mostra um sistema térmico de geração solar de energia elétrica na Califórnia-EUA.



Figura 1 – Energia solar foto térmica.

Fonte: SOLAR

Diferente da absorção fototérmica onde é preciso transformar energia térmica pelos painéis em energia mecânica cinética como em um processo a vapor, o que produz

perdas, a energia solar fotovoltaica é obtida da conversão direta da luz em eletricidade, eliminando perdas térmicas como no processo explicado anteriormente (PALZ, 2002).

É importante salientar que o processo fotovoltaico não depende do calor, fator este que diminui seu rendimento, isto foi comprovado na prática quando recentemente células solares foram instaladas no Pólo Sul: não só funcionaram muito bem, mas geraram mais potência do que se comparado a climas temperados (PALZ, 2002).

“Este comportamento é explicado pelo fato de que os fótons da luz solar transferem sua energia diretamente aos elétrons sem etapa térmica intermediária” (ALDABÓ, 2002).

A Figura 2 mostra um exemplo prático de aplicação de painéis fotovoltaicos de baixa potência.



Figura 2 – Exemplo de painel fotovoltaico
Fonte: CRESESB.

1.1 CÉLULA SOLAR

Segundo Palz (2002,p21), “A conversão direta da luz solar em energia elétrica é conseguida por meio de baterias solares, constituídas de células solares¹, por um processo que é usualmente chamado de efeito fotovoltaico²”.

Na atualidade um material semicondutor chamado silício é amplamente utilizado na fabricação de células solares, material básico para toda indústria eletrônica. O silício é um elemento químico de símbolo Si, à temperatura ambiente é encontrado no estado sólido na

¹ Tem o mesmo significado de “pilha solar”, “fotopilha”.

² Produção de diferença de potencial elétrico e ou corrente elétrica entre terminais de uma junção de semicondutores PN quando atingido por fótons.

argila, feldspato, granito, quartzo e areia, normalmente como (dióxido de silício), também conhecido como sílica. O silício é o 2º elemento mais abundante da crosta terrestre, perfazendo mais de 28% da sua massa (ALDABÓ, 2002).

Utilizando métodos apropriados obtém-se silício com um bom grau de pureza (intrínseco) cerca de 98% a 99%. Os cristais de silício obtidos são constituídos por uma estrutura atômica cristalina com ligações covalentes proporcionada pelos seus quatro elétrons de valência, vale ressaltar também que à temperatura constante, o silício puro ou intrínseco possui o número de elétrons livres igual ao número de lacunas.

A estrutura de uma célula solar é composta basicamente por duas camadas de material semicondutor comumente denominado junção P-N e terminais metálicos para “capturar” a energia elétrica, a primeira camada chamada de silício tipo N, e a segunda tipo P.

Na Figura 3 mostra-se a estrutura de uma célula solar.

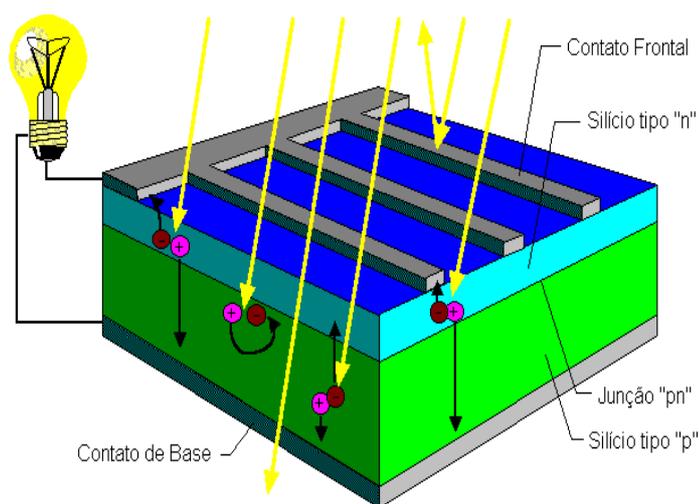


Figura 3 – Estrutura de uma célula solar.
Fonte: CRESESB.

Um semicondutor do tipo N é obtido através do processo de dopagem química, onde é adicionado ao cristal de silício intrínseco pequena porcentagem de outro composto, por exemplo, Fósforo que possui com cinco elétrons na camada de valência para aumentar a quantidade de portadores de carga negativas livres, “elétrons livres” neste caso no semicondutor.

Da mesma maneira um semicondutor tipo P é dopado com componentes, por exemplo, Boro; conhecido por ter três elétrons na camada de valência o que proporciona ao semicondutor características de “lacunas” ou portadores de cargas positiva, neste caso.

Quando os dois tipos de semicondutores são dispostos como uma junção P-N, os elétrons em excesso do cristal N migram para as lacunas do cristal P formando uma barreira de potencial elétrico, chamado gradiente, que alcança rapidamente o equilíbrio tornando-se parte integrante do dispositivo.

Com a ligação do pólo positivo e negativo da célula através de um condutor elétrico, estabelece-se uma corrente elétrica enquanto houver luz iluminando a junção. “Uma célula fotovoltaica não acumula energia, apenas é capaz de criar um fluxo ordenado de elétrons” (ALDABÓ, 2002).

1.2 TIPOS DE CÉLULAS SOLARES

As células fotovoltaicas são fabricadas em sua grande maioria usando o silício (Si). Atualmente três tipos de tecnologia dominam o mercado, cada uma com suas características, são eles: monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

1.2.1 Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino vem sendo usada em grandes quantidades desde seu desenvolvimento e ocupa o primeiro lugar como uma das mais comercializadas como dispositivo de transformação direta da luz solar em energia elétrica, seu processo de produção envolve técnicas bem desenvolvidas de purificação descritas a seguir.

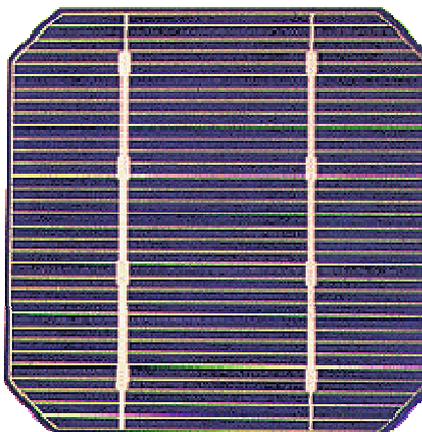


Figura 4 – Célula de silício monocristalino
Fonte: CRESESB.

A fabricação da célula de silício tem início com a retirada do ambiente do cristal de dióxido de silício. O silício comercializado é obtido a partir da sílica que passa por fornos industriais de arco elétrico com eletrodos de carbono numa temperatura superior a 1900°C, obtendo assim um alto grau de alta pureza e imediatamente a seguir purificado e solidificado.

Este processo atinge um grau de pureza aproximado em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar à faixa de 99,9999% (BRITO, 2004, p. 14).

“Para se utilizar o silício na indústria eletrônica além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura mono cristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar as qualificações desejadas é chamado processo Czochralski” (BRITO, 2004, p. 14).

Normalmente na fabricação do silício tipo P faz-se o uso de elementos químicos como o Boro de símbolo (B) caracterizado por conter lacunas em sua camada de valência, ou seja, com forte tendência a ganhar elétrons, este elemento é fundido juntamente com o silício que se torna levemente dopado.

Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300 mm. Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, devem-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000 °C (BRITO, 2004, pp. 14, 15).

É importante enfatizar que mesmo com os dispendiosos processos já citados as células baseadas em silício fabricadas atualmente possuem baixa eficiência, limitando-a em 15%, porém, são consideradas como a de melhor rendimento com relação a outros tipos de cristais, tais como o Policristalino e o Amorfo (BRITO, 2004).

1.2.2 Silício Policristalino

“As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A

eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação as células de silício monocristalino.” (BRITO, 2004, p. 15). Na fabricação do silício policristalino são utilizadas técnicas similares as do item 2.2.1 apenas com um rigor menor, resultando em eficiências comparáveis. Seu produto final pode ser aproveitado de várias formas.

- a) Corte de lingote;
- b) Em fitas;
- c) Depósito de filme em um substrato.

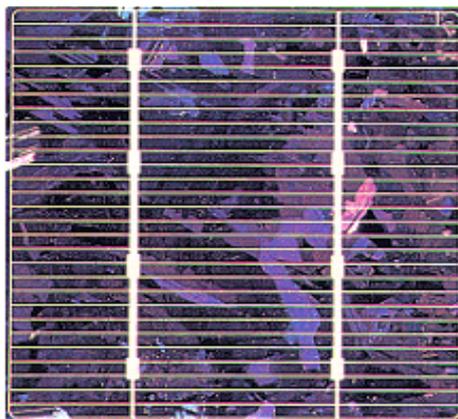


Figura 5 – Célula de silício policristalino

Fonte: CRESESB

Quando pela forma “depósito de filme num substrato” este resultado pode ser obtido por imersão ou transporte de vapor, sendo possível apenas obter o silício policristalino. Em escala industrial foi comprovado eficiência máxima de 12,5% (BRITO, 2004).

1.2.3 Silício Amorfo

Na visão de (BRITO, 2004) as células de silício amorfo diferem das outras estruturas cristalinas por conterem elevados índices de desordem na configuração de seus átomos. O uso de silício amorfo em energia fotovoltaica tem apresentado vantagens nas propriedades elétricas obtidas e no processo de fabricação.

Sua absorção de energia solar acontece na faixa de radiação visível do espectro eletromagnético e podendo ser confeccionada de acordo como exposto no item 2.2.1, estas características mostram novas possibilidades que agradam aos fabricantes de painéis fotovoltaicos de baixo custo, significando viabilidade de painéis com maiores superfícies.

Em relação às desvantagens, a célula feita a partir de silício amorfo apresenta um rápido processo de degradação nos primeiros meses de funcionamento reduzindo sua vida útil, este é um fenômeno também conhecido como efeito Staebler-Wronski.

1.3 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Um painel solar é um conjunto de células fotovoltaicas ligadas entre si e dispostas em uma estrutura de sustentação de modo a formar um módulo ou placa. Podem ainda ser instaladas de forma fixa ou dispor de dispositivos que permitam uma orientação de acordo com o movimento do sol.

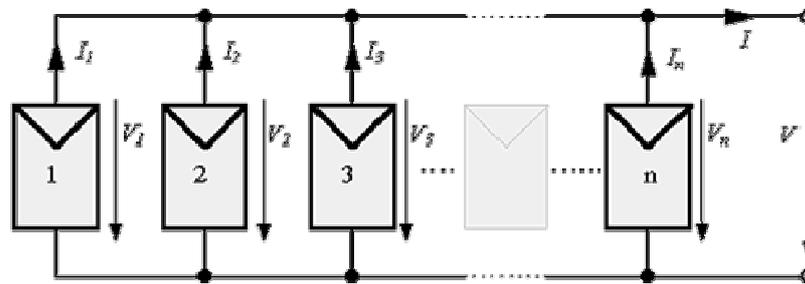


Figura 6 – Conexão de células em paralelo.
Fonte: CRESESB.

Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo.

Quando as células são conectadas em paralelo, somam-se as correntes de cada célula e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. Apesar da corrente máxima gerada estar na faixa de 3A tipicamente, a configuração de células somente em paralelo não é usual, pois resultaria em uma tensão muito baixa da ordem de 0,7V, insuficiente para a maioria das cargas mesmo em residências, exceto em aplicações muito especiais.

Na realidade, um painel fotovoltaico é composto por um conjunto de células com configuração em série para se somar a tensão de cada uma, usualmente a quantidade de células alinhadas perfazem um total de 14V em circuito aberto, sendo compatível com tensões de acumuladores (baterias) que armazenam a energia (BRITO, 2004).

Se por algum motivo houver um sombreamento em uma ou mais células, a potência gerada será muito baixa, então esta se comportará como uma carga o que pode comprometer as células adjacentes prejudicando o funcionamento das demais células do

módulo. Para evitar este mau funcionamento usa-se um diodo de passagem ou *by pass*, sua função é oferecer um caminho alternativo ao desviar a corrente elétrica da célula com problemas limitando a dissipação térmica resultante deste fenômeno.

Como todo o módulo está sujeito a ser encoberto ficaria inviável colocar um diodo a cada célula, então o que se faz é ligar um diodo a várias células (BRITO, 2004).

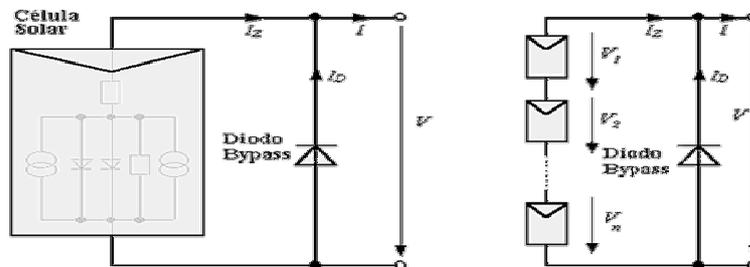


Figura 7 – Possível ligação para um diodo *bypass* entre células.
Fonte: CRESESB.

Outra situação indesejável acontece quando surgem correntes em sentido oposto fluindo pelas células, em outras palavras, o módulo se comporta como uma carga consumindo mais energia que gerando, em casos mais graves podendo ser desconectada do sistema que alimenta.

Uma solução adotada pelo autor (BRITO, 2004) é conectar diodos de bloqueio que impedem o retorno de correntes indesejáveis caso ocorra a ligação direta do módulo à bateria sem o intermédio de controladores de carga.

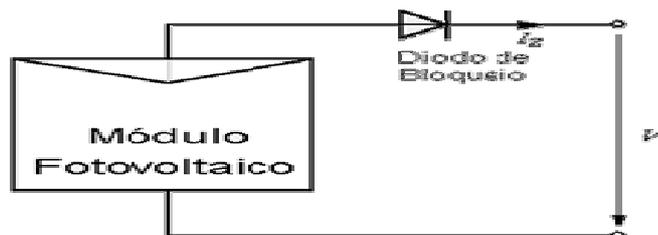


Figura 8 – Diodo de bloqueio.
Fonte: CRESESB.

Foi visto neste subtítulo os principais componentes utilizados nos painéis solares que garantem um funcionamento estável em condições adversas do ambiente.

1.4 RENDIMENTO NA CONVERSÃO ENERGÉTICA

Sobre o tema rendimento na conversão energética, adota-se como referência a norma NBR 10899 (ABNT, 2006), responsável pela terminologia da conversão fotovoltaica de energia solar que demonstra apenas o conceito de eficiência na conversão fotovoltaica, o qual é descrito como sendo divisão entre a potência máxima fornecida e a multiplicação da área do módulo (superfície iluminada) ou célula, pela irradiância total, para valores preestabelecidos de temperatura conforme a Equação 1.

$$\eta(\%) = \frac{100(\text{Potência máxima})}{(\text{Área do módulo})(\text{Irradiância})} \quad (\text{Equação 1})$$

O rendimento de um painel fotovoltaico depende da sua estrutura química, diferentes tipos de compostos químicos produzem variados índices de rendimentos. Como se pode observar na Tabela 1, painéis formados por células mono-cristalinas possuem 12 a 15% de eficiência energética na conversão, atualmente a melhor tecnologia em células de silício.

Tabela 1 – Rendimento elétrico dos vários tipos de células fotovoltaicas

	Rendimento típico	Máximo registrado em aplicações	Rendimento máximo registrado em laboratório
Mono-cristalina	12-15%	27,7%	24%
Poli-cristalina	11-14%	15,3%	18,6%
Silício Amorfo	6-7%	10,2%	12,7%

Fonte: CEEETA, 2001.

Através de pesquisas recentes alguns cientistas europeus já desenvolveram fotocélulas que utilizam materiais menos nobres comparados ao silício, como dióxido de titânio (TiO₂) e compostos orgânicos.

Com o auxílio do sistema de posicionamento automático de painéis fotovoltaicos pretende-se obter um incremento na capacidade de absorção energética ou transformação direta da energia solar em elétrica, pelo alinhamento perpendicular dos raios solares ao painel

fotovoltaico, o que não deve ser confundido com a eficiência de cada tipo de célula, sendo estas características de cada material.

2 - INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES SOBRE A TERRA

A energia liberada pelo sol é equivalente a cem bilhões de bombas de hidrogênio explodindo por segundo, o resultado é de longe o mais poderoso reator nuclear existente no sistema solar, mas aproveitar toda esta energia será um dos maiores desafios de engenharia para a humanidade. (DISCOVERY, 2009)

A intensidade da radiação na superfície do Sol é aproximadamente $6,33 \times 10^7 \text{ W.m}^{-2}$ e é liberada a uma taxa relativamente constante. Considerando-se que a radiação espalha-se com o quadrado da distância, ao percorrer a distância aproximada de $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$ (ou 1 UA – Unidade Astronômica) que separam o Sol da Terra, a energia radiante que chega a um metro quadrado da superfície terrestre é reduzida ao valor de 1367 W (ALVES, 2008, p. 11; 12).

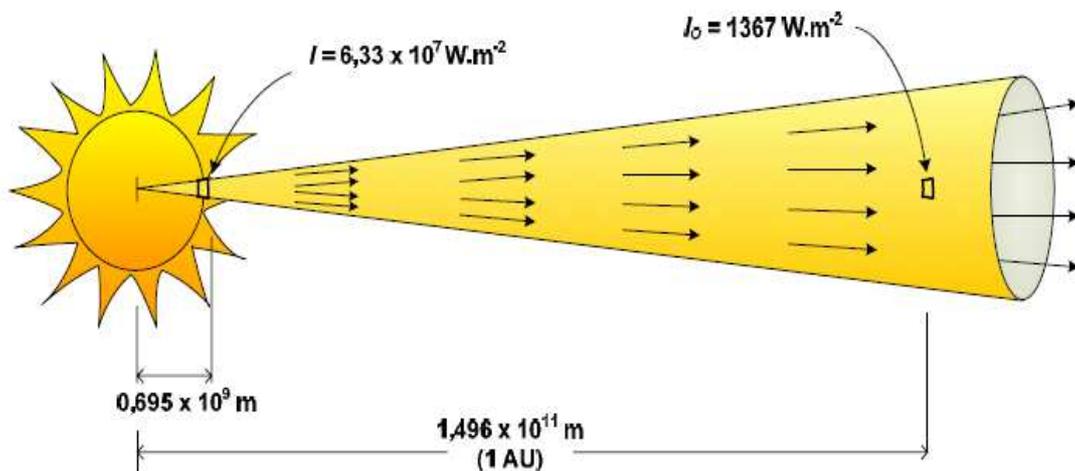


Figura 9 – Diagrama ilustrativo da divergência de energia do Sol à Terra.
Fonte: ALVES.

De acordo com Alves (2008), o valor $1367 \text{ [W.m}^2\text{]}$ é conhecido com constante solar e aceito pela comunidade astronômica internacional, podendo variar de valor a depender da unidade de medida utilizada. Segundo o mesmo autor, calcula-se que a diminuição em 1% da energia emitida pelo sol reduziria a temperatura média global em pouco mais de 1° C e

apenas a diminuição de 6% na radiação emitida bastaria para envolver toda superfície terrestre em gelo.

Como visto no capítulo anterior, o sol representa a maior fonte de energia necessária à vida que a terra possui, sendo as demais formas derivadas desta, podendo-se então denominar de fonte primordial.

Pode-se comprovar essa teoria facilmente quando se lembra que a partir da energia do sol ocorre a evaporação de grande volume de água dos rios e mares permitindo o ciclo das águas como se conhece, é possível então construir represas e gerar eletricidade com as usinas hidroelétricas, o aquecimento da atmosfera decorrente da absorção dos raios solares provoca um deslocamento de massas de ar gerando a força dos ventos.

Outras formas de energia como petróleo e o gás natural, só podem existir com a decomposição de plantas e animais também dependentes da fonte primordial.

Segundo (CRESESB, 2003) “o sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia na forma de radiação eletromagnética, o que corresponde a 10000 vezes o consumo energético da terra para este período”.

2.1 VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

As análises das variações da radiação solar ao longo do dia e do ano são importantes para o entendimento da diferença entre a eficiência que um sistema rastreador solar pode proporcionar em relação ao posicionamento fixo convencional de painéis fotovoltaicos, porém para este trabalho não é vital o conhecimento da exata angulação por se tratar de um sistema automatizado com sensores que constantemente corrigem sua posição.

Muitos fatores podem influenciar na intensidade e ângulo da incidência dos raios solares sobre um ponto na terra ao nível do mar. Além das condições atmosféricas como umidade relativa do ar, poluição, depende também da localização geográfica (latitude e longitude) e qual época do ano (estação) se encontra.

A razão pela qual se tem diferentes estações é a inclinação da terra em relação ao seu eixo polar imaginário e a rotação elíptica ao redor do sol. Ao girar de forma defasada, o calor do sol incidente é tanto maior quando mais próximo e menor quando mais distante.

Para se compreender de forma mais clara como se comporta a variação do ângulo de incidência dos raios solares em uma superfície na terra, basicamente se pode dividi-la em

duas análises: variações ao longo do dia e variações ao longo do ano. São os títulos tratados nos subitens seguintes.

2.1.1 Variações ao Longo do Dia

A medição da escala de tempo no dia, como se conhece, é baseada na rotação da terra sobre seu eixo polar. Mas para se fazer tal medição precisa-se de uma referência que neste caso é o meridiano representado por uma linha imaginária que atravessa a cidade de Greenwich, no Reino Unido, e também nos pólos da terra.

Atualmente a maioria dos países tem se baseado na conhecida hora universal, cuja referência está no meridiano principal (Greenwich), sua duração média é de 24 horas fundamentado no ‘tempo médio’ que define um dia com 24 horas, com a metade da noite correspondendo à zero hora.

O tempo médio é baseado na duração de um dia médio. A duração de um segundo ‘médio’ é obtida dividindo-se o tempo médio de uma transição completa do Sol, ao longo de um ano, por 86.400. Na prática, a duração de qualquer dia específico, medido a partir da transição completa do Sol, pode variar até 30 segundos ao longo do ano, (ALVES, 2008, p. 23).

Em sistemas fotovoltaicos fixos, para uma melhor eficiência segundo (SOLAR, 2006), devem-se orientar as placas para o lado norte. No entanto, este estudo não se aplica totalmente aos painéis móveis devendo apenas seguir alguns critérios na hora da sua instalação.

Cuidados como verificar a existência de obstrução da luz formada por sombras de árvores, e até mesmo a sobreposição de outros painéis localizados ao lado podem diminuir sua eficiência. Como o protótipo proposto neste trabalho é de pequenas dimensões e se tratando também da análise de desempenho com apenas uma célula, controlada por microcontrolador, não será abordado o estudo de distâncias entre vários painéis e possíveis obstruções causadas por fatores externos.

2.1.2 Variações ao Longo do Ano

Em função da órbita terrestre ser elíptica, a intensidade da radiação solar no espaço varia com o quadrado da distância entre terra e o sol. Essa variação da radiação está em torno de +/-3%, para o momento de maior proximidade com o sol (no mês de janeiro), que da-se o nome de Periélio, enquanto no mês de julho a terra localiza-se à maior distância do sol (Afélio).

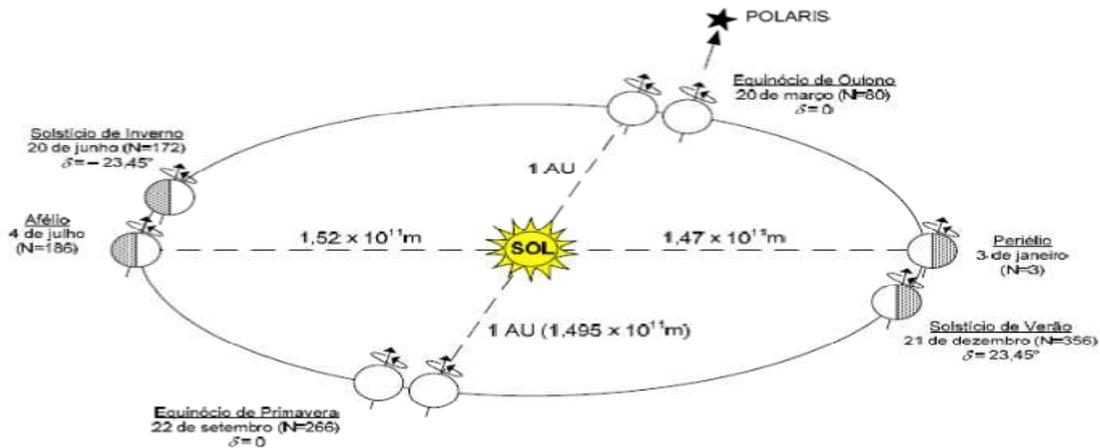


Figura 10 – Plano Elíptico de Órbita da Terra em torno do Sol.
Fonte: ALVES.

Segundo Stine e Geyer (2006), a terra leva cerca de 365,65 dias para completar a sua órbita elíptica em torno do sol, projetando uma distância média entre terra e sol 1,496 x 1011 m (ou 1 UA – Unidade Astronômica).

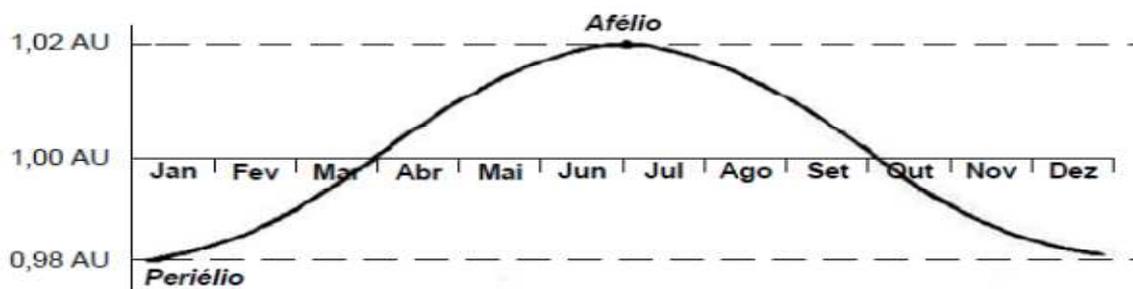


Figura 11 – Variação da distância terra sol ao longo do ano.
Fonte: Stine e Geyer.

O plano formado por essa trajetória é chamado de plano elíptico, que alcança sua distância máxima correspondente a $1,52 \times 10^{11}$ [m] e a menor distância ocorre com $1,47 \times 10^{11}$ m, conforme se pode observar na Figura 11 acima.

3 - MICROCONTROLADOR

Os microcontroladores já estão presentes no cotidiano das pessoas nos tempos atuais e em diversas aplicações, quando se é acordado por um relógio digital, ao se preparar a comida em aparelhos microondas digital, quando se dirige carros cuja injeção de combustível é microcontrolada, por exemplo.

A quantidade de produtos que funcionam com o emprego de um ou vários microcontroladores está em franca expansão. Seu uso ocorre no ambiente residencial, industrial, automotivo e está presente também nas telecomunicações. A pouco tempo atrás, antes da explosão do mercado de eletrodomésticos em todo o mundo, o alto custo dos equipamentos eletrônicos não permitia o uso em larga escala de microcontroladores, sendo que apenas os considerados de alta tecnologia o possuíam, como era o caso de aparelhos televisores e sistemas sofisticados de áudio.

No entanto com o passar do tempo e o avanço da tecnologia, a produção em massa desses dispositivos produziu uma considerável queda nos preços dos circuitos integrados, o que expandiu a sua empregabilidade em equipamentos considerados de baixo nível tecnológico, como microondas, máquinas de lavar, refrigeradores e fogões.

Com a ‘invasão’ diga se de passagem bem vinda do microcontrolador em aparelhos comuns é possível melhorar suas funcionalidades e segurança, aspecto muito importante para aplicações que interajam diretamente com pessoas, sendo em muitos casos exigido seu uso como um pré-requisito tecnológico.

Além das vantagens citadas acima, outro aspecto importante é o aumento da eficiência em alguns sistemas, como é o caso da análise deste projeto, onde se pretende aumentar a eficiência do processo de captação da energia solar através de painéis fotovoltaicos posicionados automaticamente de acordo com a trajetória dos raios solares.

Os motores elétricos com sua produção e uso em larga escala em residências e indústrias são responsáveis por cerca de 50% do consumo de energia elétrica de todo um sistema. Utilizando como exemplo o motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo que é o mais utilizado na indústria, este possui velocidade fixa de acordo com a tensão da rede aplicada a ele e alto consumo na partida, estes parâmetros podem ser melhorados através do uso de dispositivos microcontrolados que diminuem a corrente de partida e também são capazes de controlar a velocidade.

3.1 CONCEITO

De acordo com Usategui e Martínez (2003), um microcontrolador é um circuito integrado programável que contém todos os componentes de um computador. Possui um núcleo processador denominado CPU (*Central Processing Unit* em português Unidade Central de Processamento), uma memória de acesso aleatório ou RAM (*Random Access Memory*) e uma memória apenas de leitura ou ROM (*Read Only Memory*) que tem por objetivo armazenar o *Firmware* que é a programação propriamente dita do microcontrolador.

O microcontrolador é utilizado no controle do funcionamento de determinada tarefa, e devido ao seu tamanho reduzido pode ser inserido no próprio equipamento que comanda e de acordo com essa característica se pode denominá-lo de controlador embarcado (embedded controller).

Em outras palavras pode-se chamá-lo de computador dedicado. Ele possui uma memória onde se encontra um programa dedicado ao comando das atividades propostas, possui linhas de entradas e saídas de dados para conexão em sensores e atuadores do dispositivo que pretende controlar, recursos lógicos, matemáticos e toda capacidade de processamento e empregada somente na realização da tarefa designada.

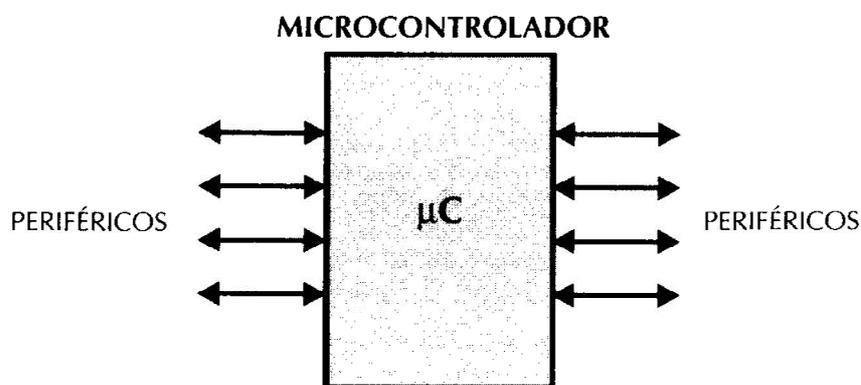


Figura 12 – Microcontrolador em um sistema fechado.
Fonte: USATEGUI e MARTÍNEZ.

Não é difícil de imaginar que se somente houvesse um único modelo de microcontrolador, o mesmo teria que ser muito potente e seu custo elevado suplantaria sua popularização. Na prática os fabricantes podem oferecer vários modelos com diferentes capacidades de processamento, memória, número de portas de entradas e saídas de dados e velocidade de funcionamento de acordo com a necessidade do projeto.

3.2 ARDUINO DUEMILANOVE ATMEGA 328

Segundo o autor e desenvolvedor (BANZI, 2008), Arduino é uma plataforma física computacional de código de fonte aberta baseada numa simples placa *input/output* entrada/saída (I/O) e um ambiente de desenvolvimento de programa com a linguagem *Processing* ou de processamento.

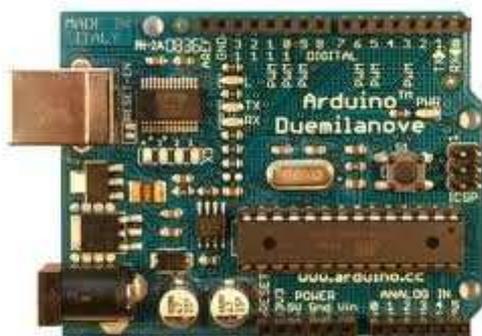


Figura 13 – Arduino *Duemilanove*.
Fonte: ARDUINO.

Esta plataforma teve seu desenvolvimento baseado no microcontrolador Atmega fabricado pela (ATMEL) uma das maiores empresas do segmento, seus primeiros desenvolvedores iniciaram este projeto em meados de 2003 no Interaction Design Institute Ivrea na Itália, são eles: Massimo Banzi, co-fundador do projeto Arduino, e Dave Cuartielles, juntamente com os designers de softwares David Mellis e Nicholas Zambetti.

Por se tratar de uma plataforma de código aberto, isto é, todos os esquemas necessários para montagem de uma placa como esta são divulgados abertamente pela Internet. Esta placa foi desenhada com fins didáticos para que estudantes, designers e artistas possam criar seus projetos interativos, sem necessariamente terem elevados conhecimentos sobre eletrônica.

Por estas características a plataforma Arduino tem se popularizado rapidamente, hoje já é possível encontrar milhares de vídeos e projetos de entusiastas de diferentes países pela Internet. Além de técnicos em eletrônica de todo mundo que acabaram por desenvolver plataformas semelhantes seguindo as linhas do projeto Arduino, são exemplos: Freeduino, CraftDuino, Seeduino, Severino, Miduino, entre outros.

O Arduino pode ser usado para desenvolver projetos dos mais variados níveis tecnológicos, desde acender um simples LED³, a complexos sistemas automatizados que utilizam motores, sensores diversos, displays, relés, e tantos outros dispositivos comandáveis pelas portas de entrada/saída (I/O).

Existem diversos modelos de placas Arduino. Para desenvolver o protótipo deste trabalho será utilizado o modelo Duemilanove, que significa dois mil e nove em italiano, ano de lançamento da placa, cujo microcontrolador é o ATmega 328. Esta escolha foi feita levando em consideração sua grande comunidade e os muitos exemplos de aplicações.

3.2.1 Características de *Hardware*

A plataforma Aduino Duemilanove é composta por diversos itens observados na figura 14.

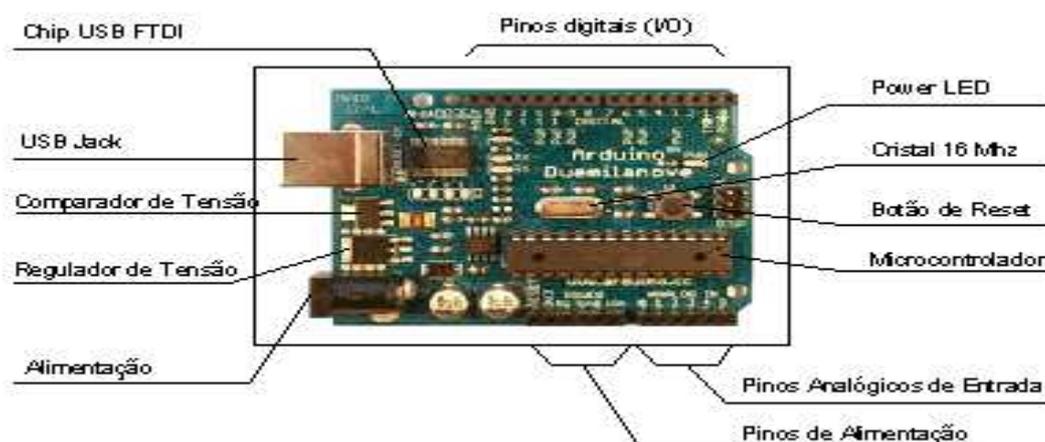


Figura 14 – Indicações da Placa Arduino Duemilanove.
Fonte: Adaptado de BANZI.

Suas principais características de *Hardware* são:

- Tamanho: 5,3cm x 6,8cm x 1,0cm;
- Microcontrolador: ATmega328;
- Tensão de operação: 5v;
- Tensão de entrada (recomendada): 7-12V;
- Tensão de entrada (limites): 6-20V;

³ *Light Emitting diode* – Diodo emissor de luz, Componente eletrônico semicondutor que emite luz quando atravessado por uma corrente elétrica.

- f) Pinos de entrada analógica: 6;
- g) Corrente DC por pino I/O: 40mA;
- h) Corrente DC para pino de 3,3V: 50mA;
- i) Pinos de entrada/saída (I/O) digitais: 14 dos quais 6 podem ser saídas PWM.

A comunicação da plataforma Arduino Duemilanove com o computador se dá através de uma conexão Universal Serial Bus (USB), com o uso de um cabo USB A para USB B, porém o microcontrolador entende apenas dados seriais. Para resolver este problema o fabricante instala um chip (FT232RL) que faz a interface entre USB e serial. Pode-se percebê-lo, na Figura 14 como um circuito integrado fabricado pela Future Technology Devices International Ltd (FTDI).

A alimentação da placa Arduino pode ser feita de duas maneiras, pelo conector padrão da fonte de alimentação com pino 2,1mm, centro positivo, alimentado por uma fonte externa adaptadora AC – DC de tensão que pode variar entre 6 a 12V, ou bateria com o mesmo nível de tensão. Outra opção seria a alimentação da placa diretamente pela porta USB.

Um melhoramento da versão mais atualizada é a seleção automática da fonte de alimentação garantida por um comparador de tensão que fica entre o conector USB e o regulador de tensão de 5V.

Possui dois LEDs Tx e Rx para indicar quando está sendo feita a transferência e gravação de dados entre o computador e a placa, possui ainda outro LED conectado ao pino digital 13 em serie com uma resistência, podendo ser ligado diretamente e verificar seu funcionamento.

3.2.2 Características de Software

A criação de programas para microcontroladores pode ser algo desgastante considerando que nos primórdios era feita no nível da linguagem de máquina, ou seja, em códigos binários que consistem em sequências de zeros ou uns.

Na medida em que cresceu a complexidade das aplicações, os programadores perceberam que associar abreviações a conjuntos de bits facilitaria na implementação e entendimento dos programas, com isto surge a linguagem assembly que significa “montagem”, como explica Pereira (2009).

Essa linguagem é aceita por vários microcontroladores, incluindo o Arduino, para ser entendida, é feita uma tradução para o código de máquina através de um interpretador chamado *Assembler*.

Porém mesmo em *assembly*, escrever um código maior para aplicações mais complexas ainda era uma tarefa desgastante foram então desenvolvidas outras linguagens acima desta, como é o caso da programação em C, C+, C++, Pascal, Basic e Java.

A linguagem C foi criada em 1972, por Dennis Ritchie, da *Bell Laboratories*, e consiste, na realidade, em uma linguagem de nível intermediário entre o *Assembly* e as linguagens de alto nível. É uma linguagem de programação genérica desenvolvida para ser tão eficiente e rápida quanto a linguagem *Assembly* e tão estruturada e lógica quanto as linguagens de auto nível (PASCAL, JAVA, etc.). (PEREIRA, 2009, p. 16)

A programação em linguagem C proporciona maior eficiência e rapidez por que compreende uma filosofia de programação estruturada, que são as funções independentes entre si, mas com intuito de cumprir determinada tarefa, ela é tão completa que foi escolhida para o desenvolvimento de sistemas operacionais como *Windows* e *Linux* (PEREIRA, 2009).

A linguagem de programação adotada para o ambiente do Arduino é baseada em C/C++, ela é escrita com o auxílio de um software desenvolvido em Java ao qual se denomina de Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE).

Principais características de *software* para o Arduino *Duemilanove* são:

- a) Memória *FLASH*: 16 KB (ATmega 168) ou 32KB (ATmega 328);
- b) 2 KB usado pelo *bootloader*;
- c) *SRAM*: 1KB (ATmega 168) ou 2 KB (ATmega 328),
que pode ser lida e escrita com a biblioteca *EEPROM*;
- d) *EEPROM*: 512 bytes (ATmega 168) ou 1 KB (ATmega 328).

3.3 FIRMWARE e BOOTLOADER

De acordo com Arduino (2009), *Firmware* nada mais é do que um conjunto de instruções para operações gravadas diretamente no *hardware* do arduino e essas informações são armazenadas na memória EEPROM e FLASH, como exemplo se podem citar alguns simples aparelhos que também o utilizam: controles remotos e calculadoras. Em fim, todo aparelho eletrônico programável possui algum *firmware*.

Na linguagem familiar do ambiente Arduino, o *firmware* que é escrito na IDE recebe o nome de *Sketch*⁴, logo que esteja completo é feito seu *upload*⁵ diretamente para o microcontrolador.

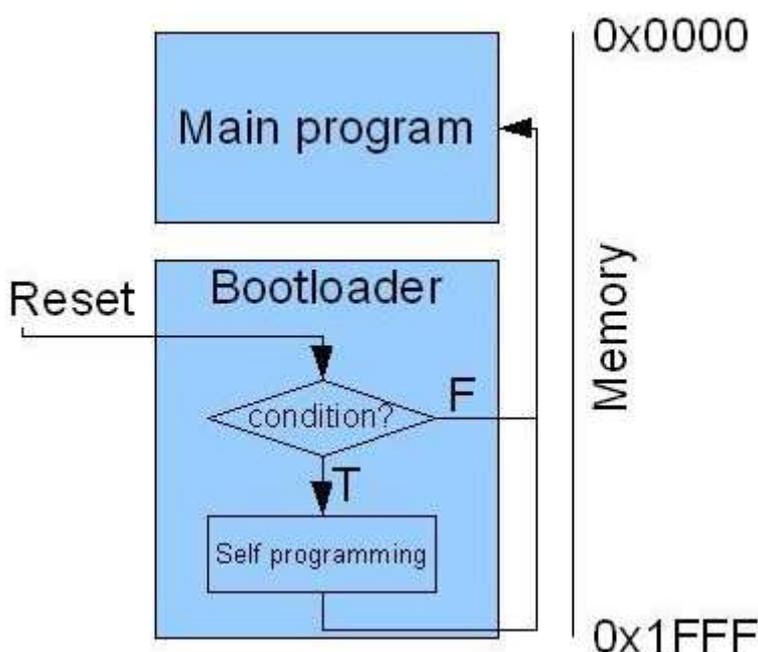


Figura 15 – Diagrama funcional de um Bootloader.
Fonte: Tugatronica.

Em um microcontrolador comum, todas as vezes que se quer gravar um novo *firmware* é preciso tirá-lo do Printed Circuit Board (PCB) e colocá-lo em um gravador. Essa operação pode trazer alguns riscos como: a quebra de pinos ou danos irreparáveis. A solução para isto é a gravação do *bootloader* que ‘roda’ primeiramente que qualquer outro programa quando se liga o microcontrolador. No Arduino é possível aproveitar a funcionalidade RS232

⁴ *Sketch* - Significa esboço em inglês.

⁵ *Upload* – Termo comum no ambiente de programação que significa ‘carregar’ ou atualizar o *firmware*.

e compilar o *sketch* diretamente na placa pelo cabo USB ou paralelo dependendo do modelo que se trabalha.

3.4 A IDE DO ARDUINO

O Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE) constitui a ferramenta computacional onde se escreve o código a ser compilado. Trata-se de um *software* feito em *Java* que contém um editor de textos, uma área de mensagem, um console de texto, uma barra de ferramentas com botões com funções comuns e alguns menus. Ele se conecta ao hardware do Arduino para permitir a compilação dos programas e está disponível para *download* em *Windows, Mac OS X, Linux* no site oficial arduino.cc. Na Figura 16 ilustra-se seu aspecto.

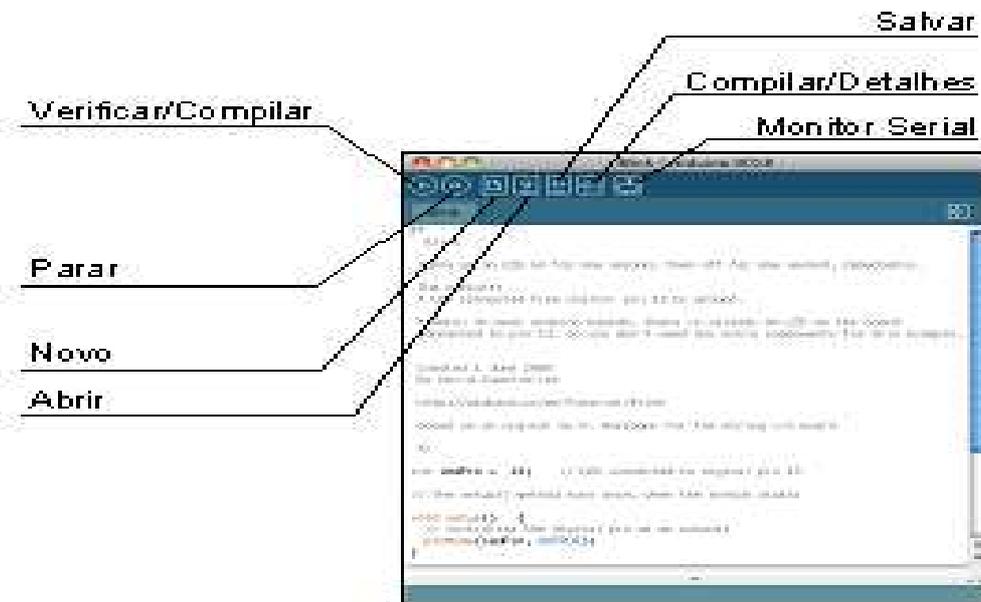


Figura 16 – Detalhes da IDE Arduino.
Fonte: Adaptado de ARDUINO.

Este ambiente de desenvolvimento apresenta-se de forma clara e de fácil entendimento, com poucos botões, porém bem posicionados. Existem muitas versões de IDE para o Arduino podendo o programador escolher a que mais lhe convier. Por se tratar de um *software* livre sua literatura é colaborativa, em outras palavras, o programador pode adquirir códigos fonte de seus respectivos desenvolvedores gratuitamente a partir de *sites* e fóruns, adequando ao seu projeto.

CONCLUSÃO

Neste estudo se fez uma revisão teórica sobre a energia solar e sua incidência sobre a Terra. Uma forma de aproveitamento desta energia é através da conversão direta em energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos. Foram comparadas diversas características construtivas e de rendimento das células fotovoltaicas. Como sua eficiência de conversão não é elevada, e como o ângulo de incidência da luz é variável ao longo do dia e das estações do ano, a aplicação de sistemas para o posicionamento dinâmico de painéis fotovoltaicos pode ser uma solução para levar o rendimento ao máximo. Para auxiliar na construção de sistemas de posicionamento de baixo custo, o trabalho revisou a plataforma microprocessada Arduino, para subsidiar a construção de um futuro protótipo. O uso de microcontroladores é possível e já foi comprovada por inúmeros trabalhos científicos e também estão implementados em algumas usinas de energia solar térmica e fotovoltaicos, sendo uma opção viável para se incrementar a eficiência na captação e conversão direta da energia solar em elétrica.

A tecnologia existente hoje para painéis solares fotovoltaicos ainda encontra-se em desenvolvimento, sua baixa eficiência abre caminho para que sistemas automatizados possam incrementar eficiência ao processo de conversão direta da energia solar em elétrica a fim de expandir os horizontes desta tecnologia e num futuro próximo diminuir a níveis toleráveis ou até eliminar a dependência dos combustíveis fósseis que trazem efeitos nocivos ao planeta terra.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10899:2006 energia solar fotovoltaica**, 2006.

ALDABÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber, 2002.

ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos**. Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu, SP, 2008.

ARDUINO. **Sobre a Plataforma Arduino**. Acesso em 23 de maio de 2011, disponível em Site da Arduino.cc: <http://www.arduino.cc/>, 2009.

ARRUDA, J. e PILETTI, N. **Toda a História** 4ª ed. São Paulo: Ática, 1996.

AULD, D. **Arduino Platform - Differential Gap Control Solar Tracker : CODE Project**. Acesso em 25 de Maio de 2011, disponível em CODE PROJECT: <http://www.codeproject.com/KB/system/ArduinoLightTrack.aspx>, 2011.

BANZI, M. **Getting started with Arduino**. editora O'reilly, 2008.

BRITO, S. **Energia solar - Princípios e Aplicações**. Acesso em 10 de 04 de 2011, disponível em Centro de referência para energia solar e eólica Sergio de Salvo Brito - CRESESB: www.cresesb.cepel.br, 2004.

CAPUANO, I. V. e CAPUANO, F. G. **Elementos de eletrônica digital**. São Paulo: Érica, 2009.

CEEETA. Acesso em 10 de 04 de 2011, disponível em **Centro de Estudos em Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente**: www.ceeeta.pt, 1997.

COMETTA, E. **Energia Solar: Utilização e empregos práticos**. São Paulo: Hemus, 2004.

CRESESB. **Coletânea de Artigos - Energias Solar e Eólica**. Acesso em 10 de Maio de 2011, disponível em CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL) / CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO: www.cresesb.cepel.br, 2003.

CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. (204p), 1999.

DISCOVERY. **Como é Possível - Painéis Solares**. Vídeo do Discovery Channel, 2009 .

FERNANDES, C. A. e GUARONGHI, V. M. **Energia Solar**. Acesso em 10 de maio de 2011, disponível em [www.fem.unicamp.br: http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/esolar/esolar.html](http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/esolar/esolar.html)

IQBAL, M. **An Intruduction to Solar Radiation**. Toronto, Canadá, 1983.

PALZ, W. **Energia solar e fonte alternativas**. Hermus, 2002.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: programação em C**. São Paulo: Érica, 2009.

SOLAR, F. **ENERGIA SOLAR - FFSOLAR**. Acesso em 15 de março de 2011, disponível em Sistemas de Energias Alternativas Portugal, 2006. Lda.: <http://www.ffiSolar.com/index.pt>

SOUSA, R. **Revolução-Industrial**. (Equipe Brasil Escola) Acesso em 24 de Maio de 2011, disponível em [brasilecola: http://www.brasilecola.com/historiag/revolucao-industrial.htm](http://www.brasilecola.com/historiag/revolucao-industrial.htm)

STINE, W. B. e GEYER, M. 2006. **Power from the Sun**. Acesso em 20 de abril de 2011, disponível em <http://www.powerfromthesun.net>

USATEGUI, J. M. e MARTÍNEZ, I. A. **Microcontroladores <<PIC>>. Diseño Práctico de Aplicaciones**. Primeira Parte: El PIC 16F84 Lenguajes PBASIC y Ensamblador (3ª Edição ed., Vol. 1). Madrid: Concepción Fernández Madrid, 2003.

VALLÊRA, A. M. 2006, **gazeta**. Acesso em 10 de Abril de 2011, disponível em [solar.fc.ul.pt: www.solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf](http://www.solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf)