

# **Controle do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos com Microcontrolador PIC**

**Edson de Paula Carvalho**  
**edson-carvalho@oi.com.br**  
**UNIFOA**

**Rômulo de Almeida Cardoso**  
**romulloalmeida@bol.com.br**  
**UNIFOA**

**Resumo:** A energia fotovoltaica oferece conhecidas vantagens, entretanto, ainda deve vencer alguns desafios, principalmente a baixa eficiência de conversão dos painéis fotovoltaicos. O alto custo da produção de energia fotovoltaica quando comparado a outros métodos de geração de energia elétrica é considerado o principal obstáculo que pode eventualmente inviabilizar a sua aplicação. Além do desenvolvimento de novos materiais, continua sendo muito importante aumentar a eficiência de conversão através da maximização da entrada de radiação solar e da otimização do ponto de operação do painel fotovoltaico. Este trabalho apresenta a aplicação do microcontrolador PIC no rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico. Este controle integra um sistema de rastreamento composto de painel fotovoltaico, conversor CC/CC, carga e microcontrolador, que tem como diferencial uso de um novo algoritmo de busca do ponto de máxima potência de passo variável e flag de controle, que garante o rastreamento perfeito mesmo na ocorrência de mudanças bruscas de insolação e temperatura. O algoritmo de controle desenvolvido para o PIC foi escrito em linguagem C visando aumentar a legibilidade, diminuir o número de linhas de código permitindo uma eventual portabilidade para outros microcontroladores. Este trabalho apresenta uma abordagem de rastreamento adequada a qualquer configuração de conversores CC/CC que venham a ser empregados entre o painel fotovoltaico e a unidade de carga do sistema.

**Palavras Chave:** Microcontrolador PIC - Rastreamento - Painel Fotovoltaico - Linguagem C -



## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar oferece grande potencial para conversão em energia elétrica, capaz de garantir uma parte importante das necessidades de energia do planeta. Como a quantidade de energia do Sol que chega à Terra é gigantesca, da ordem de 10.000 vezes o consumo mundial atual de energia, as várias formas de energia renováveis reunidas teriam a capacidade de atender o chamado "desafio terawatt" de prover a atual demanda de 13 TW da humanidade (LUQUE e HEGEDUS, 2011).

Usando painéis fotovoltaicos com uma eficiência de 10%, a energia solar poderia ser convertida diretamente em eletricidade, capaz de prover 1.000 vezes o consumo atual da humanidade. Restringindo o aproveitamento de energia solar à superfície sólida da Terra (um quarto da superfície total), ainda haveria um potencial 250 vezes maior que o consumo atual. Isso significa que usando 0,4% da área total de terra, pode-se produzir toda a energia demandada atualmente. Esta fração de terra é muito menor do que usamos atualmente para agricultura (LUQUE e HEGEDUS, 2011).

No Brasil, o uso da energia solar ainda se resume em grande parte a aquecedores para água. O uso de sistemas fotovoltaicos para produção de eletricidade ainda é bastante limitado, mas o potencial é enorme. Estima-se que, hoje, a geração de energia solar fotovoltaica no País tenha uma capacidade instalada de aproximadamente 18 MWp, em mais de 50 pequenas usinas, sendo sua maioria localizada em centros de pesquisas, universidades e em empresas do setor elétrico. Entretanto esta capacidade ainda é uma parcela irrisória, se for considerado que a atual capacidade de geração de energia elétrica no País é de 109.800 MWp, de acordo com a EPE -Empresa de Pesquisa Energética (CASTRO, 2010).

A conversão da energia fotovoltaica em elétrica ocorre quando uma junção semicondutora PN, construída de tal forma que possibilite a incidência de fótons em sua superfície, consegue gerar uma corrente CC fornecida a uma carga. Enquanto a luz estiver iluminando a célula solar, elemento individual do PV (painel fotovoltaico) será gerada energia. Quando a iluminação é interrompida, cessa a produção de energia. Células solares não necessitam ser carregadas e podem operar em ambientes externos, na superfície da terra, ou no espaço, por mais de 30 anos.

Outro fator que limita a utilização da energia proveniente do Sol é a baixa eficiência das células solares. Nos últimos anos, a pesquisa e desenvolvimento de materiais e técnicas para incrementar a eficiência das células e painéis fotovoltaicos tornaram-se muito importantes. Pesquisadores têm concentrado seus esforços na procura de soluções para que a energia gerada pelo painel fotovoltaico seja extraída de forma mais eficiente.

Uma característica que acaba por dificultar a extração de energia dos painéis solares é o comportamento não linear da tensão e corrente de saída fornecidos em sua saída.

Para cada valor de irradiação solar existe apenas um ponto onde é entregue a máxima potência para carga. Esse valor é o "ponto de máxima potência" ou MPP (*Maximum Power Point*).

O valor da potência gerada pelos painéis depende principalmente da intensidade da radiação solar incidente na sua superfície e da temperatura ambiente. Como esses parâmetros mudam constantemente, variações no ponto de máxima potência ocorrerão durante todo o tempo, portanto, o controle de rastreamento do ponto de máxima potência não é um problema trivial. Para superar esse problema várias estratégias de controle no rastreamento têm sido propostas, tais como, perturbação e observação, condutância incremental, capacitância parasita, tensão constante, redes neurais e lógica nebulosa (*fuzzy*), etc.



Para a transferência dessa máxima potência gerada pela fonte (painel fotovoltaico) ao estágio seguinte (normalmente um conversor estático CC/CC), a curva de carga deve interceptar o MPP. Nesse ponto a eficiência do sistema “gerador – carga” é máxima. Quando o **sistema** não opera no MPP, a energia fornecida à carga é inferior à energia máxima que poderia ser transferida.

Para garantir a máxima eficiência, faz-se necessária a utilização de técnicas que busquem o MPP continuamente. Elas são chamadas de “técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência” (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*). Os valores de tensão e corrente correspondentes ao MPP são utilizados para modificar a curva de impedância de entrada do conversor estático a fim de que ela intercepte o ponto de máxima potência instantaneamente (“casamento” de impedância).

## 2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho visa mostrar a viabilidade de implementação do programa de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos com a utilização do microcontrolador PIC18F4550 da empresa Microchip. Este módulo integra um sistema completo de rastreamento que tem como diferencial uso de um novo algoritmo de busca do MPP de passo variável e flag de controle, o que garante o perfeito rastreamento da potência gerada pelo painel fotovoltaico, mesmo para mudanças bruscas de insolação e temperatura. O algoritmo foi escrito em linguagem C visando aumentar a legibilidade, diminuir o número de linhas de código e permitir uma eventual portabilidade para outros microcontroladores.

## 3. ARQUITETURA PROPOSTA

A Figura 1 apresenta uma representação em blocos do sistema de rastreamento do MPP. A arquitetura proposta pode ser dividida em quatro blocos distintos que são chamados de MÓDULO FOTOVOLTAICO, CONVERSOR CC-CC, CARGA e PIC 18F4550.

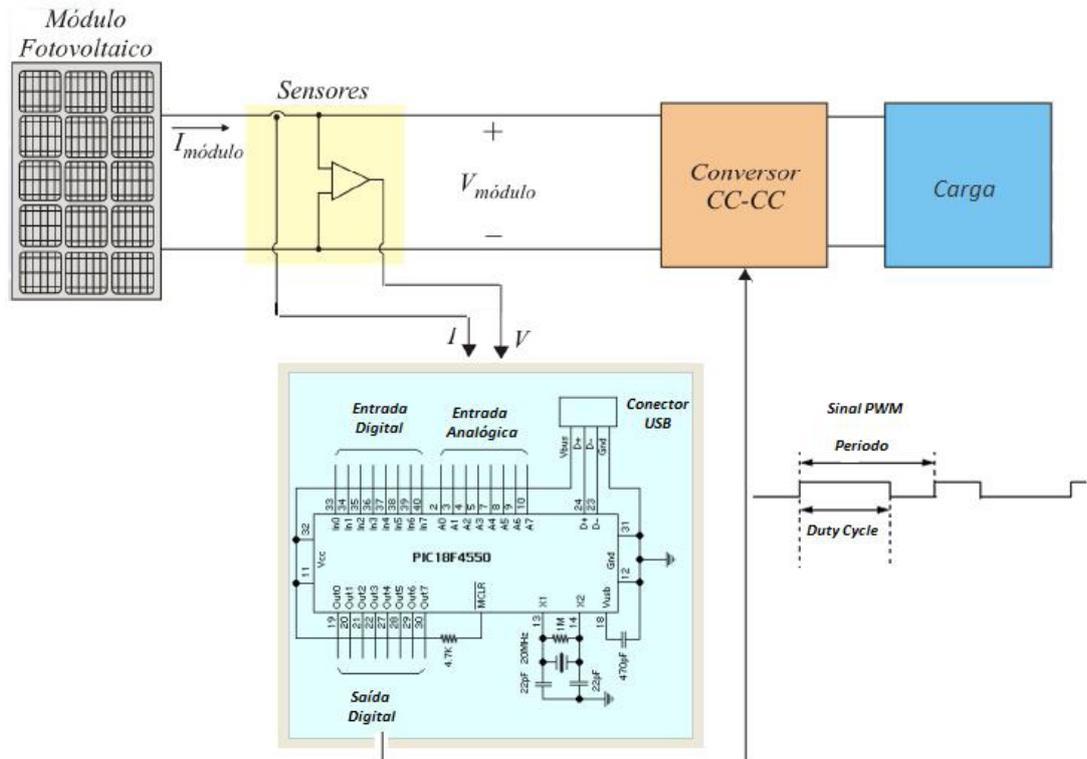


Figura 1: Circuito de rastreamento



### 3.1. MÓDULO FOTOVOLTAICO

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

O módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema. O módulo é composto por células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização prática.

É indispensável o agrupamento em módulos já que uma célula fornece pouca tensão elétrica, em torno de 0,5 V no ponto de máxima potência. A densidade de corrente é da ordem de 30 mA / cm<sup>2</sup>.

O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica na saída.

É desejável que às células empregadas no módulo tenham as mesmas características elétricas. 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.

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.

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 através da curva característica I x V, mostrada na Figura 2. Estas curvas são parametrizadas à intensidade da radiação e temperatura em que foram obtidas.

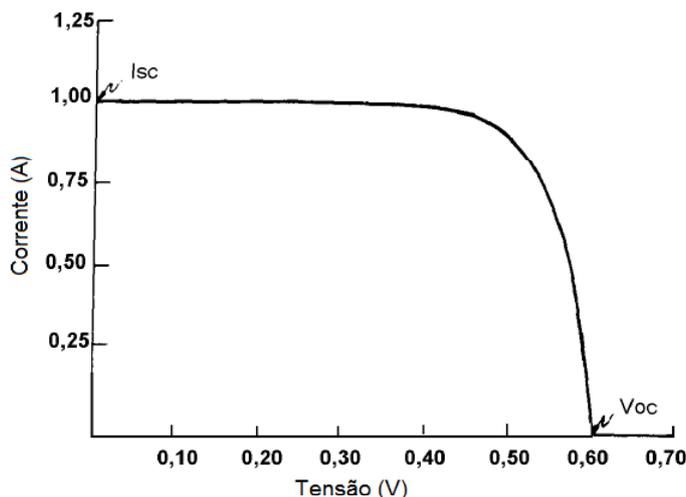


Figura 2 - Curva característica I x V típica de uma célula de silício (adaptado de CRESESB, 2004)

O produto da corrente pela tensão da célula (ou do módulo fotovoltaico) em cada ponto na curva I x V da Figura 2 gera a curva da potência vs tensão, mostrada na Figura 3.



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.

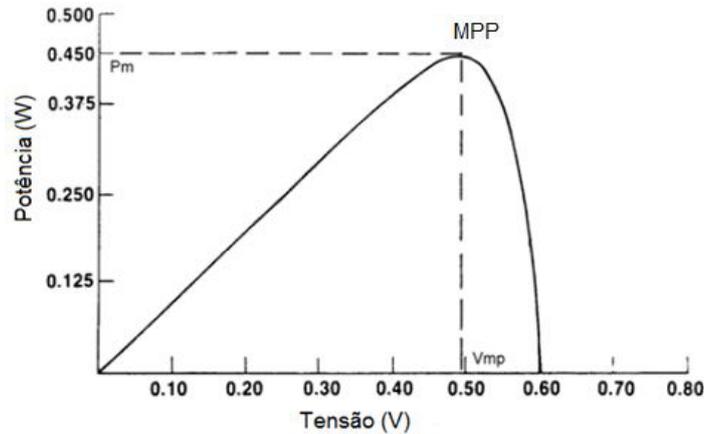


Figura 3 - Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício (CRESESB, 2004)

### 3.2. CONVERSOR CC-CC

A saída de um conversor CC-CC é diretamente proporcional ao ciclo de trabalho (*duty cycle*)  $k$  do circuito de chaveamento. Modificando-se o valor do ciclo de trabalho consegue-se controlar a tensão média  $V_o$  (Equação 1), a corrente média  $I_o$  (Equação 2) e a potência média  $P_o$  (Equação 3) fornecida à carga (ANTUNES, 2012). A Figura 4 mostra o circuito de onde derivam essas equações.

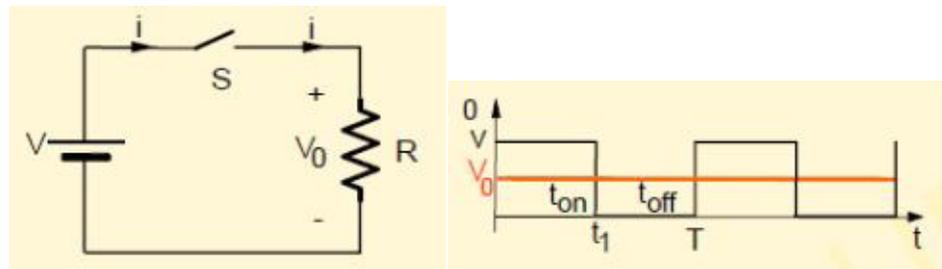


Figura 4 - Chaveamento da tensão V sobre uma carga R

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{t_1}{T} V = t_1 f V = k V \quad (1)$$

onde:

$V_o$ : tensão de saída média [V];

$k$ : ciclo de serviço =  $t_1/T$ ,  $0 < k < 1$  [adimensional], sendo:

$t_1$ : tempo em que saída está ON [s];

$T$ : período do sinal de chaveamento [s];

$f$ : frequência do sinal de chaveamento [Hz].



$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{kV}{R} = k \frac{V}{R} \quad (2)$$

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 i_0 dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} \frac{V_0^2}{R} dt = k \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

Existem vários tipos de conversores CC/CC que podem ser empregados para reduzir ou aumentar a tensão de saída, inverter a polaridade da tensão na carga ou isolar a entrada e a saída de circuitos. Há ainda os conversores para aplicações automotivas, que conseguem regenerar a energia cinética durante o processo de frenagem.

Há uma série de topologias disponíveis que podem ser empregadas em função da aplicação desejada.

Para efeito de aplicações fotovoltaicas, os conversores mais usados são:

- Conversor abaixador (*step down* ou *buck*);
- Conversor elevador (*step up* ou *boost*);
- Conversor abaixador/elevador ou conversor *buck/boost*;

A topologia empregada neste trabalho foi a buck, justifica-se pelo fato da tensão de saída do painel fotovoltaico ser maior que a tensão de regulação entregue a carga, sendo mais comum o uso de baterias como elemento de carga.

No conversor *buck* representado na Figura 5 a tensão média de saída é inferior à tensão de entrada. Conforme indicado pela Equação 1, o valor da tensão de saída  $V_0$  é proporcional ao ciclo de trabalho do conversor CC/CC.

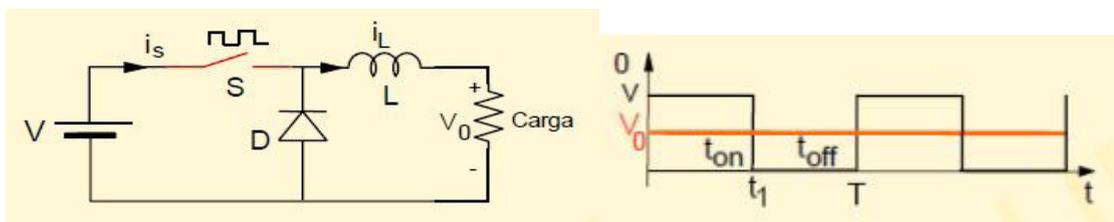


Figura 5 - Conversor abaixador (*buck*)

O diodo funciona em “roda livre” (*free-wheeling diode*) e a chave pode ser implementada por um MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

### 3.3. CARGA

Normalmente a carga consiste de um elemento acumulador de energia, para que a energia gerada durante o dia possa ser utilizada a noite. Porém existem casos onde a energia produzida é entregue diretamente ao sistema de distribuição de energia sem que seja armazenada. Também existem os sistemas mistos, isto é, uma parte da energia é armazenada para consumo próprio, e o excedente é entregue ao sistema de distribuição. Em muitos países, recentemente no Brasil, o excedente de energia é vendido à concessionária local de energia.



3.4. MICROCONTROLADOR PIC 18F4550

O microcontrolador PIC 18F4550 (Figura 6) fabricado pela empresa Microchip, pertence a uma família de dispositivos que oferecem a vantagem de um elevado desempenho computacional a um preço acessível. A família PIC18F apresenta melhorias no design que fazem destes microcontroladores uma ótima escolha para projetos sensíveis e de alto desempenho.

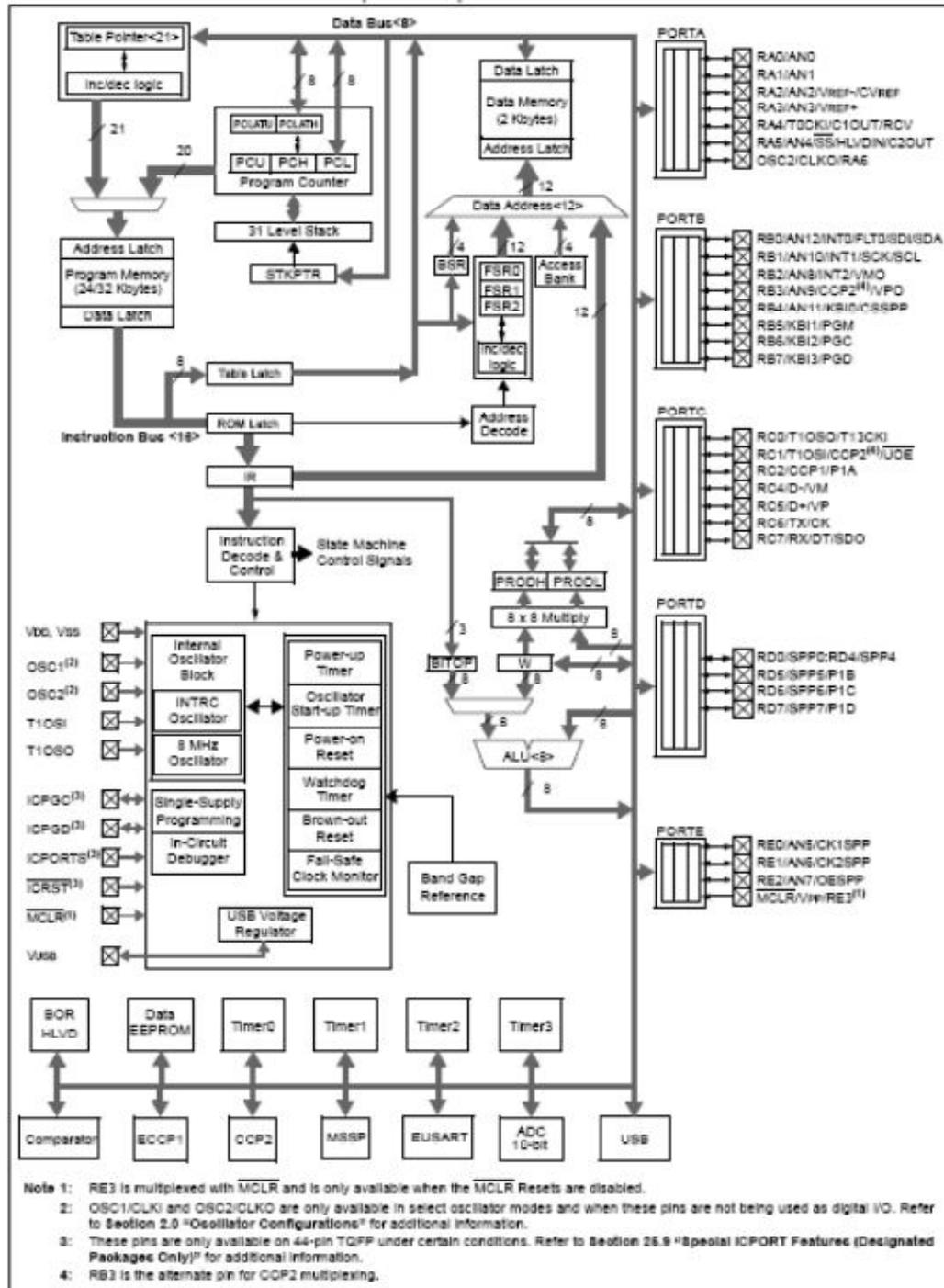


Figura 6 – Arquitetura microcontrolador PIC 18F4550



Suas principais vantagens são:

- Incorporam uma variedade de recursos que reduzem significativamente o consumo de energia durante a operação.
- Módulo de comunicação serial compatível com o USB, especificação 2.0. O módulo suporta tanto comunicação de baixa como de alta velocidade para todas as modalidades de transferência de dados.
- Oferecem doze diferentes opções de oscilador, permitindo aos usuários uma ampla gama de opções no desenvolvimento de seus projetos.
- Sua memória FLASH suporta vários ciclos de leitura/escrita. Possui uma capacidade de armazenamento de dados superior a quarenta anos.

Com a finalidade de facilitar as simulações em laboratório, foi empregado o kit didático E-P18 V3.6 (Figura 7) da empresa SEMBRA Tecnologia. Adequado para a realização de práticas laboratoriais envolvendo projetos de sistemas embarcados, automação de processos, sistemas de processadores e periféricos, dentre outros. Dotado de ampla gama de periféricos para facilitar a utilização do sistema.

Apresenta as seguintes especificações de hardware:

- Microcontrolador: PIC18F4550.
- Interface de comunicação: USB, I2C, SPI e Paralela.
- Modos de Gravação On Board: ICSP ou USB através do bootloader.
- Circuitos Sensores: Sensor de Temperatura a prova d'água e removível, potenciômetro e sensor de luminosidade LDR.
- Circuitos atuadores/sinalizadores: LEDs sinalizadores, Relé e buzzer. LED ligado a uma porta de PWM.
- Chaves e teclas: Chaves táteis (*Push Button*) e chave dip switch.
- Displays: Displays de 7 segmentos e display de LCD 16x2 alfanumérico.
- Fontes de alimentação: Via USB. Conexão para fonte externa.
- Borners para acesso aos pinos do PIC18F4550.
- Silk na placa com indicações das partes e funcionalidades do sistema.
- Sistema de auto-gravação através de *Bootloader* via comunicação USB.
- Placa Dupla face de alta qualidade permitindo o agrupamento de diversos recursos em espaço reduzido o que confere ao sistema a característica da fácil portabilidade e manuseio.

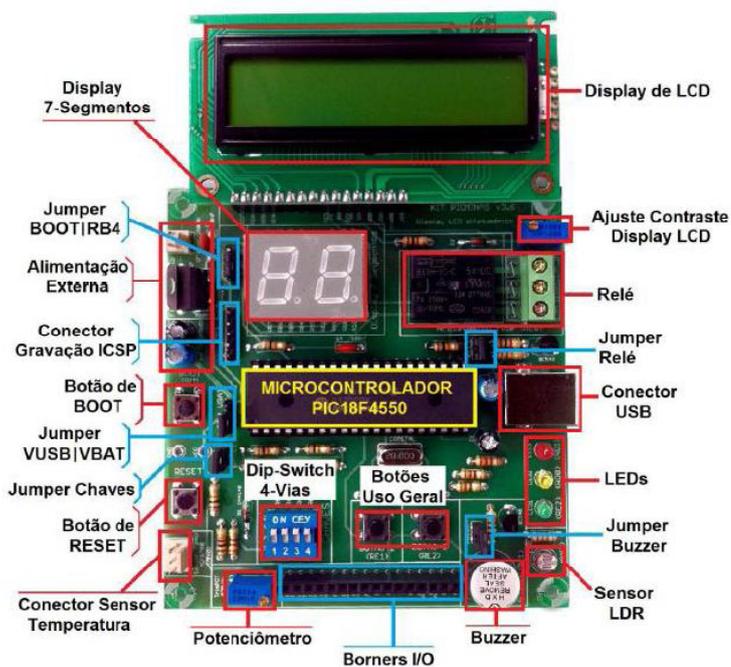


Figura 7 – Kit didático E-P18 V3.6

#### 4. PROTÓTIPO

Conforme pode ser visto pela Figura 8, os testes de validação do algoritmo de rastreamento foram realizados utilizando o kit didático E-P18 V3.6 e o software de programação fornecidos pelo fabricante. Toda a programação foi executada em linguagem C, desta forma o sistema de rastreamento torna-se independente do microcontrolador utilizado.

Nesse protótipo foram realizados os testes com o software de rastreamento proposto, testes que serviram para validar a viabilidade de implementação da arquitetura de rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico proposta na Figura 1.



Figura 8 – Protótipo



#### 4.1. ALGORITMO DE RASTREAMENTO

O ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos tem que ser rastreado continuamente de forma a compensar as variações de temperatura e luminosidade ambientes. Para que isto seja possível, o microcontrolador deve executar um algoritmo capaz de tratar as variações das condições ambientais e, em função destas variações, aplicar as compensações necessárias no conversor CC/CC para que a maior quantidade de energia seja entregue a carga.

Existem vários algoritmos capazes de efetuar o rastreamento do MPP, para este estudo foi escolhido o algoritmo proposto por Carvalho *et al* (2012). A Figura 9 representa o seu funcionamento, trata-se de uma nova abordagem para o algoritmo de perturbação e observação de passo variável, que apresenta as seguintes vantagens:

- Simplicidade;
- Uso da corrente e tensão como variável de controle;
- Fácil implementação para o conversor *buck*;
- Convergência rápida (número reduzido de iterações);
- Insensibilidade às rápidas mudanças na temperatura ambiente e irradiância.

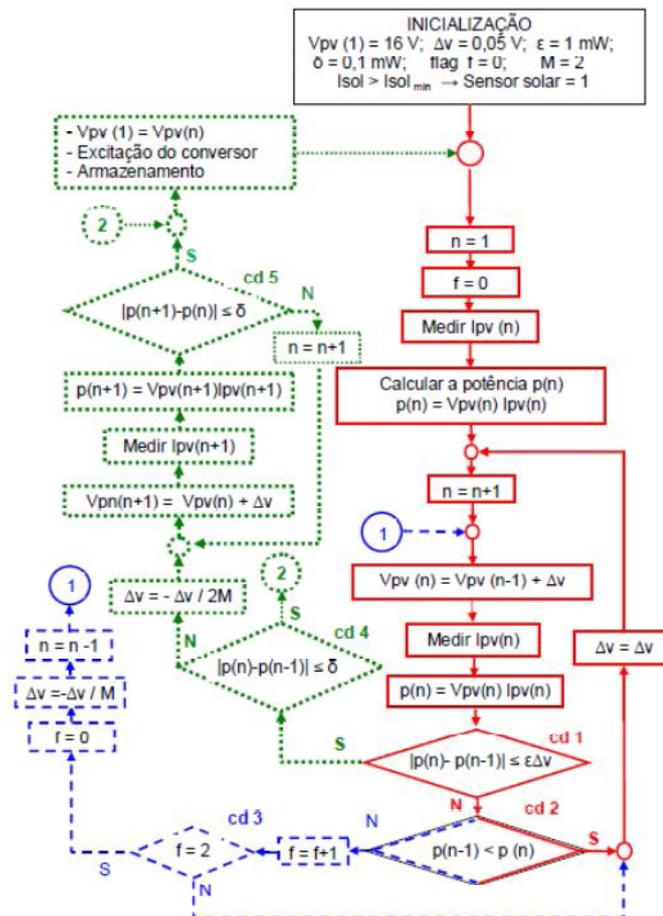


Figura 9 – Algoritmo de perturbação e observação de passo variável



#### 4.2. ALGORITMO TRANSCRITO PARA LINGUAGEM C

Uma diversidade de microcontroladores esta presente no mercado, acarretando a procura por uma programação mais fácil e amigável ao usuário. Torna-se necessário o uso de um conjunto de instruções que não sofra variações relevantes entre os microcontroladores. O uso de linguagem de alto nível, como a linguagem C, permite ao projetista do sistema uma independência do hardware que será utilizado.

O algoritmo proposto Carvalho *et al* (2012), foi transcrito para linguagem C, possibilitando então a sua utilização em microprocessadores PIC de modelos e fabricantes diferentes do escolhido para este trabalho. A Figura 10 mostra parte do algoritmo de rastreamento já em linguagem C, como pode se ver, a interface de programação é muito mais amigável que a linguagem de máquina dos microcontroladores.

```
.....
ALGORITMO DE RASTEAMENTO DO MPP EMPAINÉIS FOTOVOLTAICOS(PIC18F4550)
.....
* Nome do Arquivo:          Rastreador.c
* Dependencias:            Veja a seção INCLUDES abaixo
* Processador:             PIC18F4550
* Opção de Clock:          HS 40MHz (externo)  Tosc = 13 ns
* Compilador:              C18 v3.20 ou superior
/** INCLUDES *****
#include <pl8xxx.h>          // Necessário para que o compilador adicione a biblioteca
#include <delays.h>
#include <adc.h>            // Uso do A/D conversor
#include <math.h>           // Necessário para usar o comando fabs linha 69
#include <pwm.h>            // Inclui as funcoes da saida PWM
#include <timers.h>         // Timer2 do PWM
#include "my_xlcd.h"        // Escrever no LCD
#include <stdlib.h>         // Gera um int para String
#include <string.h>         // Concatenar Strings
#include "show_xlcd.h"      // Exibir as variáveis
/** DEFINES *****
#define corrente            PORTAbits.RA0 // Entrada externa RE1 usada para ler corrente
#define tensao             PORTAbits.RA1 // Entrada externa RE2 usada para ler tensão
#define M                  2 //Variável M
#define EDV                0.001 //Ajuste grosso da potência
#define DELTA              0.0001 //Ajuste fino da potência
/** PROTOTIPOS PRIVADOS *****
void ConfiguraSistema(void);
void ConfiguraPWM(void);
/** FUNCOES *****
* Funcao:                  void main(void)
* Entrada:                 Nenhuma (void)
* Saida:                   Nenhuma (void)
* Descrição:               Função principal do programa.
/*****
* Funcao:                  void ConfiguraSistema(void)
* Entrada:                 Nenhuma (void)
* Saida:                   Nenhuma (void)
* Descrição:               InicializaSistema , rotina de configuração principal do PIC. Configura as portas de I/O e os
                          perifericos
*****
void ConfiguraSistema(void)
{
    ADCON1 |= 0x0F;
    OpenXLCD();
    OpenADC (ADC_FOSC_64 & ADC_INT_OFF & ADC_RIGHT_JUST & ADC_12_TAD, ADC_CH0
    & ADC_VREFPLUS_VDD & ADC_VREFMINUS_VSS, ADC_2ANA);
    ConfiguraPWM() // Função que configura a saida PWM
    return;
}
/*****
* Funcao:                  void ConfiguraPWM(void)
* Entrada:                 Nenhuma (void)
* Saida:                   Nenhuma (void)
* Descrição:               ConfiguraPWM é a rotina principal do PWM
*****
void ConfiguraPWM(void)
{
    OpenTimer2(TIMER_INT_OFF // Desabilita interrupções
    & T2_PS_1_1); // Prescaler = 1
    OpenPWM2(110); //Tref = 17.4d
    PR2 = 119; //PWM_Period = [(PR2) + 1] * 4 * Tosc *(TM2 prescaler)
    TRISbits.RC1 = 0; //Configura a porta RC1 como saida do PWM
} //end ConfiguraPWM

/** VECTOR REMAPPING *****
// Rotina necessária para o compilador C18 saber onde é o inicio do vetor de "reset".
// Copiar na integra esta parte do código dentro do arquivo "main.c" com o Bootloader no PIC.

extern void _startup (void); // See c0181.c in your C18 compiler dir
#pragma code REMAPPED_RESET_VECTOR = 0x1000
void _reset (void)
{
    _asm goto _startup_endasm
}
/** EOF main.c *****
```

Figura 10 – Algoritmo em linguagem C



## 5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios práticos em laboratório mostraram-se satisfatórios, o microcontrolador PIC 18F4550 demonstrou ser suficientemente robusto no controle do duty cycle do conversor CC/CC frente às variações de temperatura e luminosidade. A programação em linguagem C torna a compilação do algoritmo de rastreamento para linguagem de máquina extremamente simples.

A arquitetura interna do microcontrolador PIC 18F4550, que inclui o conversor A/D, gerador PWM, grande capacidade de memória e elevada velocidade de processamento, disponibilizam o hardware necessário para o projeto da etapa de controle do sistema de rastreamento fotovoltaico.

A próxima etapa deste trabalho consistirá da integração do microcontrolador, painel fotovoltaico e carga ao conversor buck, permitindo a avaliação prática da eficiência do novo algoritmo de rastreamento.

## 6. REFERÊNCIAS

**ANTUNES, F. L. M.** Conversores CC-CC. Disponível em:

<[http://www.dee.ufc.br/~fantunes/Elet\\_Potencia/Aulas/Eletronica%20de%20Potencia%20unidade%206.pdf](http://www.dee.ufc.br/~fantunes/Elet_Potencia/Aulas/Eletronica%20de%20Potencia%20unidade%206.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2012.

**CARVALHO, E. P.; PRADO, P. P. L.; GONÇALVES, J. B.** Uma nova abordagem de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos. 2012. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2012.

**CASTRO, C.** A terra do Sol. Revista Renergy Brasil. 2. ed., p. 42, 44-45, set. /out. 2010.

**CRESESB.** Energia solar- Princípios e aplicação. Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf)>. Acesso em: 04 ago. 2011.

**LUQUE, A.; HEGEDUS, S.** Handbook of photovoltaic science and engineering. Instituto de Energía Solar, Universidade Politécnica de Madri. Madri: Wiley, 2. ed., 2011.