

Algoritmo Genérico para Controladores de Painéis Solares Fotovoltaicos.

Neste trabalho é desenvolvido e apresentado um algoritmo geral de controlo para colocar os painéis solares fotovoltaicos a funcionar no ponto óptimo, isto é de máxima potência, perante condições ambientais variáveis ou mesmo quando o painel é substituído por outro com diferentes características eléctricas.

O nível de radiação solar e a temperatura ambiente em que os painéis solares fotovoltaicos funcionam, bem como as suas características eléctricas determinam as coordenadas do ponto óptimo de funcionamento destes dispositivos. Painéis solares com diferentes características nominais obrigam a diferentes interfaces de potência ou a interfaces configuráveis. Este algoritmo permite detectar a posição do ponto de funcionamento do painel e determinar o valor da variável de referência que, sendo seguido, leva o painel a funcionar no ponto de máxima potência. É também identificado o coeficiente de parametrização deste algoritmo que permite fazer a adaptação a sistemas com diferentes características dinâmicas.

In this work is developed and presented one generic control algorithm to place the photovoltaic panels operating at the optimal point, this means in the point of maximum power, under variable environment conditions or when the panel was changed by another with different electrical characteristics.

The level of sunlight radiation and the temperature at which photovoltaic panels operate, as well as its electrical characteristics determine the optimal point coordinates of these equipments. Photovoltaic panels with unlike nominal characteristics need different power interfaces or configurable interfaces. The algorithm presented in this paper detect the operating point of the panel and compute the reference value, that, when tracked, put the panel operating on the maximum power point. Also is identified the coefficient of parameterisation of the algorithm, which allows to do the adaptation to systems with unlike dynamics.

I. INTRODUÇÃO

☉ sol é uma fonte de energia virtualmente inesgotável e não poluente. Com o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos estão disponíveis no mercado painéis solares fotovoltaicos de baixo preço para utilização no exterior com garantia de 20 anos. Estes painéis são dispositivos semicondutores de estado sólido que convertem directamente a radiação electromagnética visível e não o calor em energia eléctrica. O processo fotovoltaico é totalmente realizado em estado sólido, não possuindo partes móveis e não sendo consumidas ou libertadas quaisquer matérias [1]. Estes factos levam ao interesse e possibilidade de utilizar a energia solar em substituição de outras fontes energéticas poluentes em perspectiva de se esgotarem. Para a mesma radiação solar incidente, os painéis solares fotovoltaicos apresentam maior rendimento energético quando funcionam a temperaturas baixas. Em climas temperados os painéis solares disponibilizam menos energia no inverno que no verão, contudo isto não é devido às baixas tempe-

raturas, mas sim à menor radiação solar média que ocorre no inverno em relação ao verão.

II. DESCRIÇÃO

Para uma incidência de luz uniforme e sendo todas as células iguais, o painel fotovoltaico pode ser representado matematicamente pela equação da junção PN ideal:

$$i(v) = I_{SC} \left(1 - \frac{e^{(v/V_{th})} - 1}{e^{(V_{oc}/V_{th})} - 1} \right) \quad (1)$$

em que:

i - Corrente debitada pelo painel; v - Tensão aos terminais do painel; I_{SC} - Corrente de curto circuito; V_{oc} - Tensão em circuito aberto; V_{th} - Tensão térmica;

onde: $V_{th} = m k T / q$

m - Número de células do painel; k - Constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23} \text{ W.s/deg}$); T - Temperatura absoluta Q - Carga do electrón ($1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$)

A equação (1) está representada graficamente na figura 1, a localização do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point* - MPP) varia com a radiação solar incidente no painel (ψ) e com a temperatura (T). O gráfico expressa a corrente em função da tensão, $i(v)$, e indica o deslocamento do MPP devido às variações em causa. Uma diminuição da radiação solar ψ de 1000 W/m^2 para 200 W/m^2 , o que corresponde a um decréscimo de 80 %, provoca uma diminuição em I_{SC} na mesma proporção e uma redução em V_{oc} de cerca de 4%.

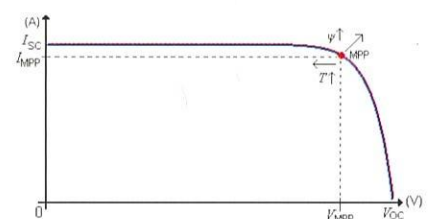


Figura 1 Curva $i(v)$ característica de um painel solar fotovoltaico.

ALGORITMO GENÉRICO PARA CONTROLADORES DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Como a localização do MPP pode variar, é necessário para um bom aproveitamento do painel que o ponto de funcionamento (QF) seja colocado no MPP, e que o acompanhe quando este se desloca. Tal mecanismo é denominado seguidor do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracker* - MPPT) [2]. É representado a seguir na figura 2 o gráfico da potência em função da tensão, $p(v)$. Este gráfico representa o MPP e o sentido do seu deslocamento devido a alterações da temperatura e da radiação solar.

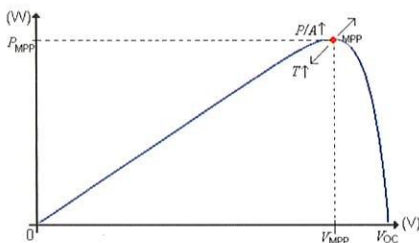


Figura 2 Característica $p(v)$ de um painel solar fotovoltaico com identificação do MPP e dos sentidos de variação que pode apresentar.

Derivando $p(v)$ em ordem à tensão v , figura 3, surge uma função cujo zero corresponde ao MPP identificado na figura 2 como sendo o extremo relativo e único.

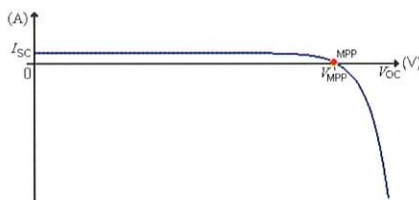


Figura 3 Derivada da potência em ordem à tensão para um painel fotovoltaico e indicação do MPP.

O gráfico da figura 3 mostra que sempre que o QF está à esquerda do MPP a derivada da potência em ordem à tensão é positiva. Neste caso a tensão aos terminais do painel deve aumentar, levando a que o QF se desloque para a direita, aproximando-se do MPP. Durante o aumento da tensão a sua derivada em ordem ao tempo é positiva.

No caso em que o QF se encontra no MPP a tensão aos terminais do painel não deve ser alterada. Quando a derivada da potência em ordem à tensão é negativa, o QF está à direita do MPP, o MPPT deve reagir de forma a que o QF se desloque para a esquerda, para tal é necessário que a tensão aos terminais do painel diminua. Durante a diminuição da tensão aos terminais do painel a sua derivada em ordem ao tempo toma valores negativos.

A estratégia de funcionamento do MPPT exposta é representada analiticamente em (2).

$$\begin{cases} \frac{dp}{dv} > 0 \xrightarrow{\text{MPPT}} \frac{dv}{dt} > 0 \\ \frac{dp}{dv} = 0 \xrightarrow{\text{MPPT}} \frac{dv}{dt} = 0 \\ \frac{dp}{dv} < 0 \xrightarrow{\text{MPPT}} \frac{dv}{dt} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Considerando a variável v' ($v' = dv/dt$) uma função de v , isto é $v'(v)$. De acordo com a teoria qualitativa dos sistemas dinâmicos [3], um ponto é fixo se é verificada a seguinte condição:

$$v'(v) = 0 \quad (3)$$

Um ponto fixo é atrator quando para esse ponto se verifica que:

$$\frac{dv'}{dv} < 0 \quad (4)$$

A constante de tempo é definida para o ponto de atracção como:

$$\delta = \left(\frac{dv'}{dv} \right)^{-1} \quad (5)$$

Para implementar o MPPT de forma a respeitar a funcionalidade expressa em (2) é necessário escolher uma função $v'(v)$ de evolução temporal do sistema e verificar que ela respeita as condições de estabilidade (3), (4) e que permite estabelecer (5) com valor conveniente. Escolhendo por hipótese a expressão:

$$v'(v) = \alpha \frac{dp}{dv} \quad (6)$$

onde α é real, positivo e não nulo.

A condição (2) é sempre respeitada porque dv/dt tem sempre o mesmo sinal que dp/dv visto que α é um real positivo não nulo. De acordo com o gráfico da figura 3 dp/dv toma valor nulo quando QF está no MPP, logo esta função respeita a condição (3). A função dp/dv toma valores negativos e positivos para valores de tensão respectivamente acima e abaixo do MPP, logo a derivada de dp/dv em ordem a v é negativa no ponto MPP e como α é positivo, então é respeitada a condição (4).

Aproximando o diferencial total à variação, $dt \approx \Delta t$, em que Δt é o período entre duas amostragens sucessivas, segue-se de (6):

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \alpha \frac{dp}{dv} \\ \frac{\Delta v}{\Delta t} = \alpha \frac{\Delta p}{\Delta v} \\ \Delta v = \Delta t \cdot \alpha \frac{\Delta p}{\Delta v} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_{\text{New}} - v_{\text{Old}} = \Delta t \cdot \alpha \frac{\Delta p}{\Delta v} \\ v_{\text{New}} = v_{\text{Old}} + \Delta t \cdot \alpha \frac{\Delta p}{\Delta v} \\ v_{\text{New}} = v_{\text{Old}} + K \frac{\Delta p}{\Delta v} \end{cases}$$

Em (7) e v_{New} e v_{Old} representam respectivamente as tensões de referência da nova iteração e da iteração anterior. A constante K é o produto de Δt por α , esta constante é tanto maior quanto menor for a constante de tempo δ apresentada em (5).

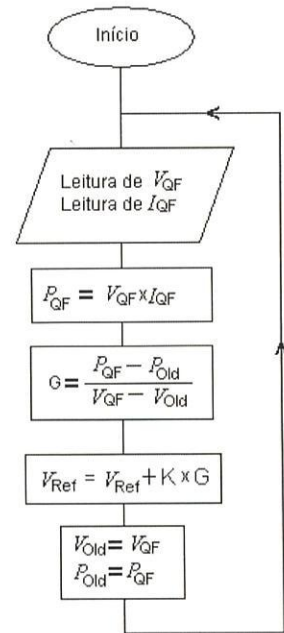


Figura 4 Fluxograma do MPPT para painéis fotovoltaicos.

As variáveis V_{Old} e P_{Old} representam a tensão e a potência da iteração anterior. A tensão V_{QF} , a corrente I_{QF} e a potência P_{QF} , são correspondentes à iteração que está em curso. A variável V_{REF} representa a tensão de referência que é atualizada em cada ciclo de cálculo.

III. SIMULAÇÕES

São realizados quatro conjuntos de simulações. O primeiro conjunto é referente a um mesmo painel. São simuladas diferentes condições de radiação solar incidente, que provocam diferentes valores de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto circuito (I_{sc}). A estes diferentes valores das variáveis que parametrizam o modelo matemático do painel solar apresentado em (1) correspondem diferentes localizações do MPP. É comparado o ponto de funcionamento em que o MPPT coloca o sistema, com o MPP identificado na característica $p(v)$ do painel solar. No segundo conjunto de simulações é criada uma situação em que as condições ambientais variam ao longo do tempo sendo observado o comportamento dinâmico do MPPT. O terceiro conjunto de simulações é referente à substituição de um painel solar por outro com diferentes características eléctricas e sob diferente radiação solar. A substituição de um painel por outro é feita sem qualquer alteração

no algoritmo de controlo ou no seu parâmetro de configuração. Por fim, no quarto conjunto de simulações, é observado o fenómeno de oscilação provocado por uma má parametrização do algoritmo. Todas as simulações foram realizadas para uma temperatura de funcionamento do painel solar de 313 °K, foi suposto que o atraso cometido pelo equipamento electrónico era de 50 ms. Para todas as simulações a variável de referência V_{REF} foi inicializada em zero, desta forma este valor não tem que ser ajustado consoante as características eléctricas do painel.

IV. RESULTADOS

As primeiras simulações foram realizadas para condições de funcionamento que levam a V_{OC} e I_{SC} de (26V 1,7A), (27V 5,6A) e de (28V 9,5A) a estas condições correspondem potências máximas respectivamente de 40,0 W, 137 W e de 241 W, tal como pode ser observado nas características $i(v)$ e $p(v)$ representadas na figura 5. A constante K de parametrização do algoritmo foi ajustada para 10 mΩ

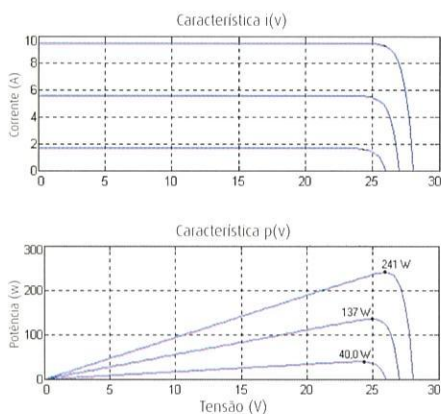


Figura 5 $i(v)$ e $p(v)$ para a temperatura de 313°K e para diferentes radiações solares incidentes.

A figura 6 mostra o resultado das simulação da aplicação do algoritmo do MPPT apresentado neste trabalho. Os valores de potência indicados no gráfico $p(v)$ da figura 5 distam no máximo de 2,5% dos valores em que o MPPT coloca o sistema.

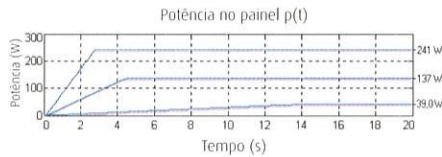
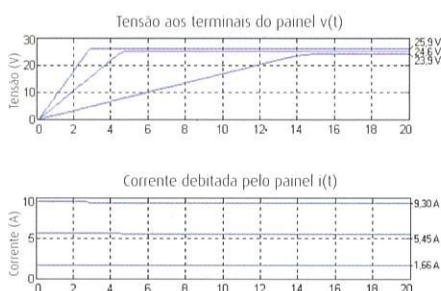


Figura 6 Resultados de simulações para as condições da figura 5

Esta simulação torna visível que a tensão de funcionamento do painel solar é crítica para a conversão de energia. Se por hipótese fosse escolhida uma tensão fixa de funcionamento de 25,9 V, para a situação de maior incidência solar seria obtida uma potência de 241 W e para a situação de menor incidência uma potência nula. No entanto, na situação de menor incidência solar, devido ao MPPT é obtida uma potência de 39,0 W, o que mostra a importância de seguir com exactidão o MPP. A figura 7, referente ao segundo conjunto de simulações, representa os valores de V_{OC} e I_{SC} em função do tempo. Nestas condições o MPPT age de forma a que o ponto de funcionamento do sistema varie ao longo do tempo, isto é visível na figura 8. Também nesta simulação a constante K teve o valor de 10 mΩ.

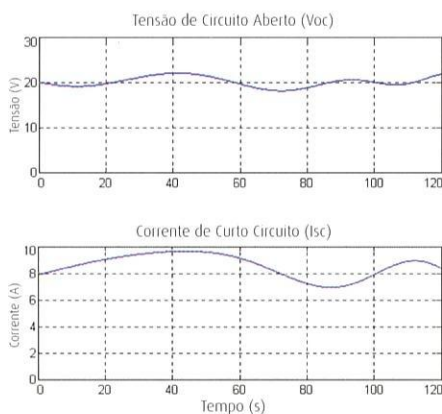


Figura 7 V_{OC} e I_{SC} para condições ambientais variáveis.

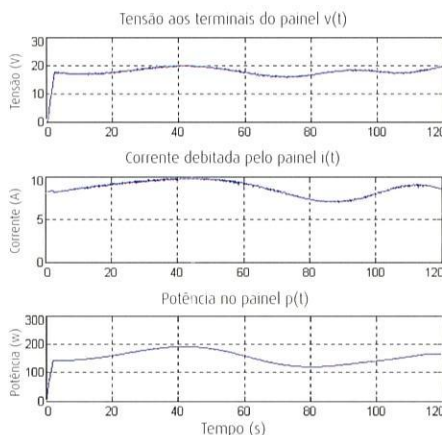


Figura 8 Funcionamento dinâmico do MPPT obtido para as condições da figura 7.

O facto das condições de funcionamento do painel solar variarem ao longo do tempo leva a que a potência de funcionamento varie também ao longo do tempo, este funcionamento dinâmico do sistema imposto pelo MPPT não provoca instabilidade, tal como pode ser observado na figura 8.

O terceiro conjunto de simulações mostra o desempenho do MPPT quando o painel solar é substituído por outro com diferentes características eléctricas sem que seja alterado o parâmetro de configuração K do algoritmo. Com esta simulação é pretendido mostrar que o algoritmo apresentado neste trabalho pode ser utilizado para funcionar com diferentes painéis solares sem que seja necessário proceder a qualquer ajuste em função do painel que é utilizado. Para esta simulação o parâmetro K tomou o valor de 5 mΩ em vez dos 10 mΩ utilizados nas simulações anteriores, isto torna a aproximação ao ponto óptimo mais lenta mas estável para um maior leque das características eléctricas dos painéis solares. A figura 9 representa as características $i(v)$ e $p(v)$ para dois painéis diferentes e sob distintos níveis de radiação solar que levam a diferentes correntes de curto circuito e tensões de circuito aberto. Um dos painéis apresenta V_{OC} e I_{SC} de (32V, 5A) e o outro de (12V, 20A).

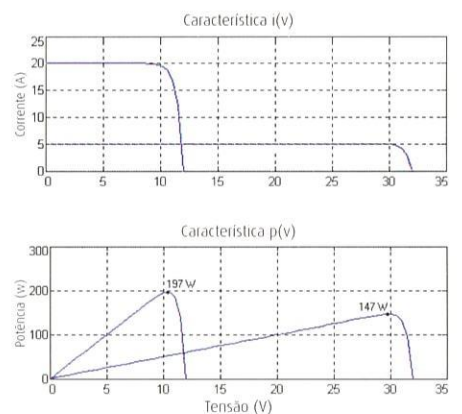


Figura 9 $i(v)$ e $p(v)$ para dois painéis solares diferentes.

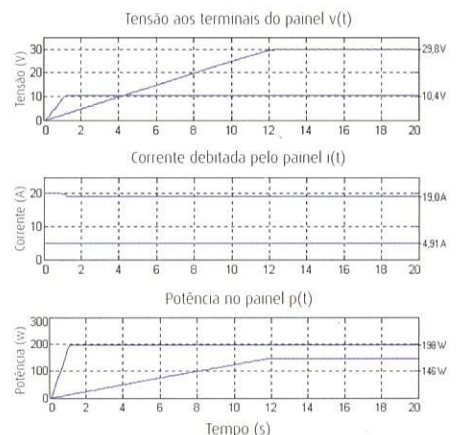


Figura 10 Resultados de simulações para as condições da figura 9.



ALGORITMO GENÉRICO PARA CONTROLADORES DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Os gráficos representados na figura 10 mostram o desempenho obtido mesmo com painéis solares com diferentes características eléctricas. Caso fosse mantida a tensão de referência próxima dos 10 V para ambos os painéis solares, seria obtida uma potência de cerca de 197 W com um deles e de 50 W com o outro. Com a deslocação do ponto de funcionamento providenciada pelo MPPT para perto dos 30 V foi obtida uma potência de 147 W em vez de 50 W, isto pode ser observado nos gráficos acima referidos.

A última simulação mostra a entrada em oscilação do sistema quando é atribuído ao parâmetro K um valor excessivamente elevado. Nesta simulação foram utilizadas as características, já usadas anteriormente, para o painel solar de (27V 5,6A). A constante K foi definida com um valor cinco vezes superior ao utilizado no primeiro e segundo grupo de ensaios.

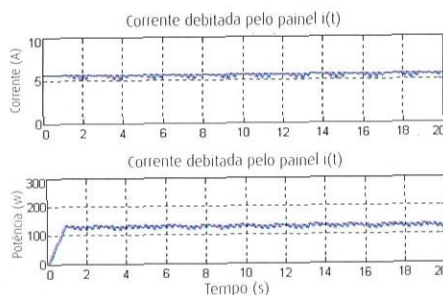
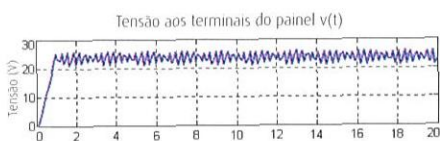


Figura 11 Instabilidade provocada por errada parametrização do algoritmo.

A figura 11 mostra a existência de oscilações na tensão, na corrente e na potência debitada pelo painel solar. Esta instabilidade provoca a não permanência do QF no MPP o que leva a que ao longo do tempo não seja feita a máxima conversão possível de energia pelo painel solar.

V. CONCLUSÕES

O MPPT simulado com base no algoritmo estudado neste trabalho apresenta um bom desempenho para condições de funcionamento constantes ou variáveis ao longo do tempo. Em todas as situações foi atingido o ponto óptimo de funcionamento, com a excepção do ultimo caso em que foi ilustrada a

situação de oscilação devido à errada parametrização do algoritmo. Ficou identificado o único parâmetro de configuração do algoritmo, representado por K . O MPPT também se mostrou capaz de controlar sistemas com diferentes painéis solares sem que fosse necessário alterar o parâmetro K . Este algoritmo, representado na figura 4 na forma de fluxograma, é pouco complexo e mostrou-se eficiente para este tipo de aplicações. Desta forma fica definido um algoritmo de controlo que proporciona ao longo do tempo a máxima conversão de energia com painéis solares fotovoltaicos, quando estes apresentam características eléctricas variáveis ao longo do tempo e para condições ambientais variáveis ou mesmo quando são substituídos por outros com diferentes características eléctricas. ☛

REFERÊNCIAS

- [1] Frank Van Der Vleuten (Free Energy Europe BV), Dominique Guillardau (Free Energy Europe AS), Amorphos Solar Panels Now Affordable and Reliable.
- [2] Yan Hong Lim e D.C. Hamill, Simple Maximum Power Point Tracker for Photovoltaics Arrays, ELECTRONICS LETTERS 25th Maio 2000, Vol. 36, No. 11.
- [3] Edward R. Schinerman, Invitation to Dynamical Systems, ISBN 0-13-185000-8



CARLO GAVAZZI LDA

Lisboa / Porto
Tel. 21 361 70 60 • Fax 21 362 13 73
www.carlogavazzi.com

Solução Global em Automação Industrial



Controlo

- Relés de Monitorização
- Temporizadores
- Energia
- Controlo de Temperatura
- Indicadores Digitais



Comutação

- Relés Estáticos
- Relés Electromecânicos
- Arrancadores Suaves
- Comutadores

