

CARACTERIZAÇÃO DE CURVAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS BASEADO EM CARGA CAPACITIVA: ANÁLISE DO TRANSITÓRIO DO CAPACITOR

Erick Matheus da Silveira Brito – erickk.brito@gmail.com

Heverton Augusto Pereira – heverton.augusto@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica

Aristides Ribeiro – ribeiro.ufv@gmail.com

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola

Allan Fagner Cupertino – allan.cupertino@yahoo.com.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

Resumo. Com o crescente aumento da demanda mundial de energia elétrica e, conseqüentemente o investimento em sistemas fotovoltaicos no Brasil e no mundo, torna-se cada vez mais importante o desenvolvimento e aprimoramento desta tecnologia. A caracterização de painéis solares fotovoltaicos constitui uma importante ferramenta para análise do comportamento e eficiência em condições de teste e de operação. Além da verificação e detecção de defeitos e mal funcionamento do painel, a análise das curvas I-V permite também avaliar o desempenho do painel para diferentes condições climáticas, evidenciando fatores relevantes como irradiância incidente, temperaturas ambiente e das células que constituem o painel e condições de sombreamento. Existem vários métodos para se traçar a curva I-V dos painéis. A utilização de carga capacitiva é uma solução bastante interessante para a variação das grandezas elétricas e aquisição dos pontos da curva. Este trabalho tem por objetivo determinar o tempo necessário para se carregar completamente o capacitor de carga, bem como o valor ideal de capacitância para cada potência de entrada. Esta metodologia tem como finalidade apresentar diretrizes para o projeto dos componentes do caracterizador. A estimativa de tempo teórica foi comparada com simulações do painel fotovoltaico utilizando-se o MATLAB/Simulink. Além disso, são apresentados resultados experimentais realizados na cidade de Viçosa-MG. Os tempos calculados e simulados apresentaram erros relativos na ordem de 12-13%. Concluiu-se que os tempos de carga do capacitor dependem da capacitância conectada, da irradiância e da temperatura do painel.

Palavras-chave: Caracterização de curvas I-V, Sistema fotovoltaicos, Carga capacitiva, tempo de carregamento

1. INTRODUÇÃO

No presente cenário mundial de aumento do consumo de energia elétrica, aliado à atual crise hídrica que o Brasil enfrenta, novas formas de geração de energia têm sido estudadas de forma a promover uma alternativa para suprir o aumento desta demanda. Além das energias provenientes do aproveitamento de biomassa e do vento (eólica), a energia solar fotovoltaica vem ganhando muita força devido à alta disponibilidade (quase infinita) de energia solar, baixos impactos ambientais na geração e recentes incentivos governamentais no Brasil e no mundo.

Atualmente, o total de capacidade de usinas fotovoltaicas instaladas ultrapassa os 180 GWp, segundo (REN21, 2015). No Brasil, a contribuição da energia fotovoltaica na matriz energética é de aproximadamente 0,02% (BIG, 2016), representando mais de 25 MWp em setembro deste ano (Junior, 2015). Apesar deste baixo valor, o crescimento desta tecnologia é inspirador, ainda mais considerando as atuais políticas de incentivo e as recentes normas regulatórias para a conexão deste sistema à rede elétrica.

Baseadas na Audiência Pública 42/2011, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou em 2012 a Resolução Normativa 482 que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração (menor ou igual a 100 KW) e minigeração (entre 100 KW e 1 MW) conectada aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Com essa resolução o consumidor de energia elétrica que produzir mais energia do que consome, pode enviar o excedente de energia à rede e ganhar crédito da concessionária (ANEEL, 2012). Em 2015, a ANEEL aprovou uma revisão desta norma, aumentando ainda mais os incentivos e tornando os investimentos nesta (e em outras formas de geração distribuída) ainda mais atrativos (ANEEL., 2015).

A conversão de energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos se dá através da excitação, na presença de radiação solar, dos elétrons no material semicondutor que constitui a célula fotovoltaica. Este processo é chamado de efeito fotovoltaico e sua eficiência depende do tipo de material utilizado e das tecnologias de conversão da energia, podendo variar desde valores abaixo de 10% até valores superiores à 40% (Donovan, Bourne, & Roche, 2010) (Mahmoud, et al., 2014). Os fabricantes desta tecnologia fornecem os parâmetros dos painéis para condições padrão de teste, executadas em irradiância de 1000 W/m², temperatura das células de 25 °C e AM (*air mass*) igual à 1,5. Entretanto, estas condições são muito diferentes das condições climáticas encontradas diariamente, sendo necessário o estudo destes parâmetros em condições de operação do painel (Mahmoud et al, 2014).

As curvas características de um dispositivo fotovoltaico, que pode ser composto por uma única célula, por um painel ou um arranjo (associação de painéis) consiste na representação matemática do comportamento da corrente elétrica em função da tensão. A determinação dessa curva é imprescindível na caracterização dos módulos fotovoltaicos, pois através dela que se obtêm informações sobre o desempenho do painel, condições de sombreamento, falhas de conexão e detecção

de outras possíveis anomalias (Bühler, 2007). Além da curva I-V, pode-se analisar a curva P-V, multiplicando cada valor de tensão pelo correspondente valor de corrente. Fig.1 representa as curvas I-V e os pontos mais relevantes para análise.

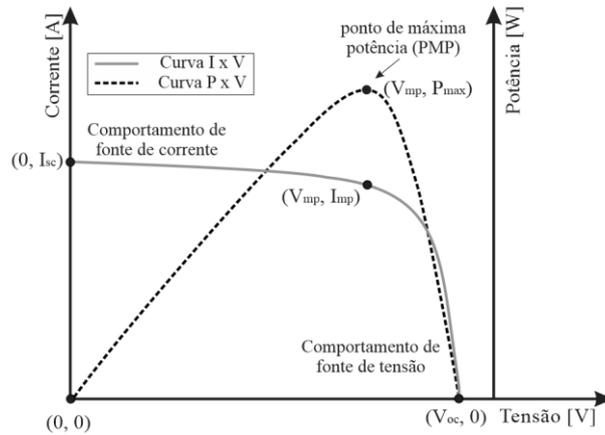


Figura 1– Curva característica de um painel fotovoltaico (Malta, 2013).

Os painéis fotovoltaicos são extremamente sensíveis às variações de temperatura e irradiância, implicando diretamente na alteração do formato das curvas características. A análise da mesma, além de fornecer informações importantes sobre a condição de operação do painel, ainda é capaz de identificar grandezas climáticas às quais o painel está exposto. Ao se traçar as curvas características, (Markvart & Castañer, 2003) salienta que os pontos mais importantes para análise são:

- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): Valor máximo de corrente gerado quando o painel opera em curto (resistência de carga nula);
- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): Tensão entre os terminais do painel quando este opera sem carga (resistência de carga infinitamente grande);
- Ponto de máxima potência (P_{MAX}): Ponto da curva onde o produto entre tensão e corrente na curva I-V fornece o máximo global da curva P-V. É a máxima potência gerada pelo painel nas condições de operação em que ele se encontra.

Existem várias técnicas empregadas na caracterização de curvas em painéis fotovoltaicos, cujo objetivo é variar a tensão e corrente em seus terminais. Este trabalho utiliza uma carga capacitiva alimentada pelo painel com intuito de analisar o transitório do capacitor para o levantamento das curvas características.

2. MODELAGEM DO CARACTERIZADOR DE CURVAS

A Fig.2 representa o modelo elétrico equivalente de um painel fotovoltaico. (Bühler, 2007) descreve este modelo composto por uma fonte de corrente, um diodo e resistências série e paralelo. A corrente I_{PV} está diretamente relacionada com geração de corrente elétrica devido à radiação solar incidente, por meio do efeito fotovoltaico. O diodo do modelo apresenta uma tensão de condução com valor igual à tensão de circuito de circuito aberto V_{OC} , eliminando a corrente na carga quando este valor é atingido. A resistência R_S equivale às perdas por conexão e resistência da junção semicondutora, enquanto que R_P se refere às perdas por correntes de fuga. Estes dois valores de resistência são estimados por meio da metodologia proposta por (Villalva, 2010), visto que esses parâmetros não são fornecidos pelos fabricantes. O algoritmo se baseia no fato de existir um único par (R_S, R_P) de forma que o modelo matemático gere a máxima potência em condições padrão de teste (*Standard Test Conditions* – STC, 1000 W/m², 25 °C e 1.5 AM).

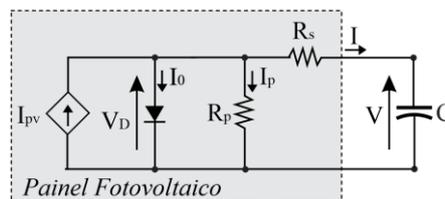


Figura 2 – Modelo equivalente do painel fotovoltaico (Campos, 2013).

Segundo Reinhold (1980), a corrente I que alimenta a carga pode ser descrita pelo conjunto de equações a seguir,

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_S I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{I_P}{R_P} \quad (1)$$

$$I_{PV} = I_{SC} + \alpha_{I_{SC}}(T - T_R) \frac{G}{G_R} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I_{SC} + \alpha_{ISC}(T - T_R)}{\exp\left[\frac{V_{OC} + \beta_{VOC}(T - T_R)}{aV_T}\right] - 1} \quad (3)$$

$$V_t = \frac{N_S k T}{q} \quad (4)$$

onde I e V são respectivamente a corrente e tensão entregues à carga pelo painel, I_{PV} é a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, V_T é a tensão térmica do painel, α_{ISC} e β_{VOC} são respectivamente os coeficientes de temperatura para a corrente e tensão, T e T_R são as temperaturas do painel e de referência, assim como G e G_R representam a irradiância incidente e de referência. As constantes E_G , e A são a energia da banda de depleção do material semiconductor e o fator de idealidade do diodo. São também constantes a carga do elétron q e a constante de Boltzman k. N_S é o número de células em série do painel.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CURVAS BASEADO EM CARGA CAPACITIVA

De acordo com (Brito, 2014), a caracterização é definida como um instrumento, tecnologia ou algoritmo com função de traçar as curvas de um sistema fotovoltaico. O princípio básico é baseado no controle da corrente de saída I do painel do seu ponto inicial de curto-circuito I_{SC} até zero, atingindo a condição de circuito aberto. A tensão V de saída é também monitorada de zero até V_{OC} . Existem diferentes técnicas para a realização de tal tarefa, tais como resistência variável, carga eletrônica, conversores estáticos CC/CC e cargas capacitivas (Duran, Piliouguine, Sidrach-de-Cardona, Galan, & Marquez, 2008). Este último método será avaliado no presente trabalho.

A utilização de carga capacitiva para a caracterização de curvas dos painéis fotovoltaicos constitui um método mais eficiente e com custos mais baixos, se comparados aos outros métodos anteriormente citados. O seu princípio básico de funcionamento consiste na utilização de um capacitor alimentado pelo painel, que irá carregar até a tensão máxima aplicada (V_{OC}). Durante este processo de carregamento, o capacitor, por ser um elemento passivo armazenador de energia, evita variações bruscas de tensão e à medida que essa grandeza se incrementa, a curva é traçada obtendo-se os pontos de tensão e corrente. A Fig.3 mostra a conexão do painel com a carga capacitiva, bem como a evolução da tensão e corrente em função do tempo.

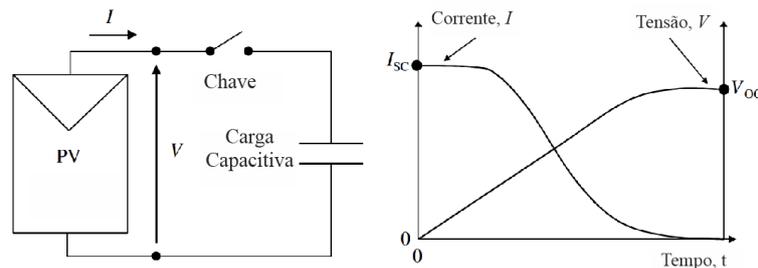


Figura 3 – Esquema de ligação do painel com a carga capacitiva e evolução da tensão e corrente em função do tempo (Muñoz & Lorenzo, 2004).

Este método apresenta, como limitação, a necessidade de descarregar o capacitor toda vez que uma nova aquisição é realizada. Para isso, é utilizada a chave S_1 para desconectar o painel do capacitor e poder descarregá-lo, utilizando circuitos separados com resistências para dispersão da energia. Outra limitação dessa topologia é a tensão máxima do capacitor (Muñoz & Lorenzo, 2004).

O valor de capacitância a ser utilizado constitui parte fundamental do projeto de caracterização baseado em carga capacitiva. Este valor influencia diretamente no tempo necessário para que o capacitor esteja completamente carregado. O dimensionamento deste tempo é de grande importância no projeto, pois além de otimizar o processo, ainda implica diretamente na quantidade de pontos que a curva possui, e conseqüentemente na sua precisão e eficiência. O tempo mínimo de coleta de cada ponto depende do sistema de processamento que está sendo utilizado para a aquisição dos pontos da curva.

2.2 DETERMINAÇÃO MATEMÁTICA DO TEMPO DE CARGA DO CAPACITOR

Para determinar matematicamente o tempo de carga para um capacitor C conectado ao painel fotovoltaico, é necessário ter conhecimento da equação diferencial deste elemento:

$$I_C = \frac{CdV}{dt} \quad (5)$$

Através das leis de Kirchooff, aplicadas à Fig.2, considerando $R_P \gg R_S$ e eliminando a corrente I_P de Eq. (1) tem-se que:

$$I = I_{PV} - I_D \quad (6)$$

Derivando os dois lados das Eq. (6) e (7):

$$\frac{dR_s I}{dt} + \frac{dI}{dt} = \frac{dI_D}{dt} \quad (8)$$

$$R_s \frac{dI}{dt} + \frac{dV}{dt} = \frac{dV_D}{dt} \quad (9)$$

(Nashelsky & Boylestad, 1996) definem as equações do diodo como sendo:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{AV_T} - 1\right) \right] \quad (10)$$

$$V_D = V_T \ln\left(\frac{I_D + I_0}{I_0}\right) \quad (11)$$

Derivando a Eq. (11), tem-se que:

$$\frac{dV_D}{dt} = -V_T \left(\frac{1}{I_{PV} + I_0 - I} \right) \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

Substituindo as Eq. (5) e (11) na Eq. (7) tem-se que:

$$\left[R_s + \frac{V_T}{(I_{PV} + I_0 - I)} \right] \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = 0 \quad (13)$$

(Mahmoud M. , 2006) propõe que considere $R_s = 0$ a fim de simplificar a equação e encontrar o tempo mais rápido de carga do capacitor. Portanto, integrando a Eq. (13) e considerando a condição inicial de $I(t) = I_{PV}$, tem-se que:

$$I(t) = \frac{(I_{PV} + I_0)}{\left[1 + \frac{I_0}{I_{PV}} \exp\left(t \frac{(I_{PV} + I_0)}{CV_T}\right) \right]} \quad (14)$$

Substituindo as Eq. (6), (7) e (10) na Eq. (14), tem-se finalmente que:

$$V(t) = V_T \ln \left[\left(\frac{I_{PV} + I_0}{I_0} \right) \left(1 - \frac{I_{PV}}{I_{PV} + I_0 \exp\left(t \frac{(I_{PV} + I_0)}{CV_T}\right)} \right) \right] \quad (15)$$

Isolando o tempo na Eq. (15) e considerando $V = V_{OC}$ é possível determinar t_{voc} ou o tempo que o capacitor leva para atingir a tensão de circuito aberto.

$$t_{voc} = \frac{CV_T}{(I_0 + I_{PV})} \ln \left[\frac{\left(I_{PV} \exp\left(\frac{V_{OC}}{V_T}\right) \right)}{\left(I_0 + I_{PV} - I_0 \exp\left(\frac{V_{OC}}{V_T}\right) \right)} \right] \quad (16)$$

Seja n o número de pontos na curva a ser traçada e t_{aq} o tempo de aquisição do instrumento utilizado na coleta de dados, tem-se que:

$$t_{voc} = n t_{aq} \quad (17)$$

2.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a validação do modelo, este trabalho propõe a determinação do tempo de carga do capacitor de forma matemática, utilizando as equações do painel e aplicando-as nas equações diferenciais do capacitor. Posteriormente, será feita uma análise na plataforma MATLAB/Simulink, onde é utilizada a modelagem completa de painel solar para simular o seu comportamento conectado ao capacitor. Por fim, será feita uma montagem experimental a fim de comparar os tempos obtidos através do osciloscópio com os calculados e simulados, utilizando capacitores com valores diferentes. Em todos os casos, o painel utilizado é o representado pela Tab. 1 e os valores de resistência serie e paralela do painel foram determinados pelo algoritmo de (Villalva, 2010).

A plataforma MATLAB/Simulink fornece ferramentas para se realizar a modelagem de um painel solar fotovoltaico regido pelas Eq. (1) a (5). As simulações então são realizadas através de diagramas de blocos, aproximando ao máximo o seu comportamento da realidade. Já a montagem experimental foi realizada conforme a Fig.4. A chave S_1 possui carácter manual e os capacitores testados são todos do tipo eletrolítico. Para a medição de corrente e tensão, utilizou-se um osciloscópio TDS1001-B e uma sonda de corrente A622, ambos da marca Tektronix.

Neste experimento, foram testados cinco valores de capacitância variando de 100 μ F até 2200 μ F. O experimento é realizado com o capacitor inicialmente descarregado. Quando a chave S_1 é ativada, o painel carrega o capacitor até sua tensão V_{OC} de circuito aberto e o osciloscópio é responsável pela leitura dos valores de tensão e corrente.

Tab. 1 - Parâmetros do painel solar.

PARÂMETRO (POR PAINEL)	SÍMBOLO	VALOR
Potência máxima (W)	P_{MAX}	48
Tensão de máxima potência (V)	V_{MP}	18,6
Corrente de máxima potência (A)	I_{MP}	2,59
Tensão de circuito aberto (V)	V_{OC}	22,1
Corrente de curto circuito (A)	I_{SC}	2,89
Coefficiente de temperatura de V_{OC} (V/K)	β_{VOC}	-0,07
Coefficiente de temperatura de I_{SC} (A/K)	α_{ISC}	0,00166
Resistência em série (Ω)	R_S	0,2144
Resistência em paralelo (Ω)	R_P	108,9

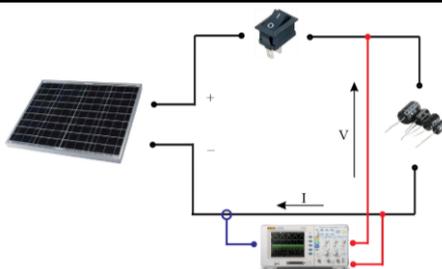


Figura 4 – Montagem experimental do painel conectado a carga capacitiva.

3. RESULTADOS

A correta modelagem do caracterizador através da análise transitória do capacitor implica diretamente na eficiência e precisão do projeto. Por isso, os tempos teóricos são comparados com os de simulação. As Fig. 5 (a) e (b) mostram, respectivamente, a evolução da tensão e corrente para os tempos calculados, utilizando as Eq. (14) e (15), e simulados no MATLAB/Simulink, ambos com uma carga capacitiva igual a 1 mF.

Pela análise destas figuras, nota-se que o comportamento das curvas de tensão e corrente da simulação apresentam distorção. Isto pode ser explicado pelas resistências série e paralelo presentes no modelo completo do Simulink e que foram desconsideradas durante o cálculo teórico. As simplificações feitas para este caso também resultam numa redução de V_{OC} para na Fig.5 (a). Todavia, apesar destas discrepâncias, o tempo de carga do capacitor para o caso teórico e o simulado foram de, respectivamente, 8,353 ms e 9,55 ms, apresentando um erro relativo de 12,53%. A montagem experimental foi realizada também para um capacitor de 1 mF e a Fig.6 mostra o resultado obtido pelo osciloscópio.

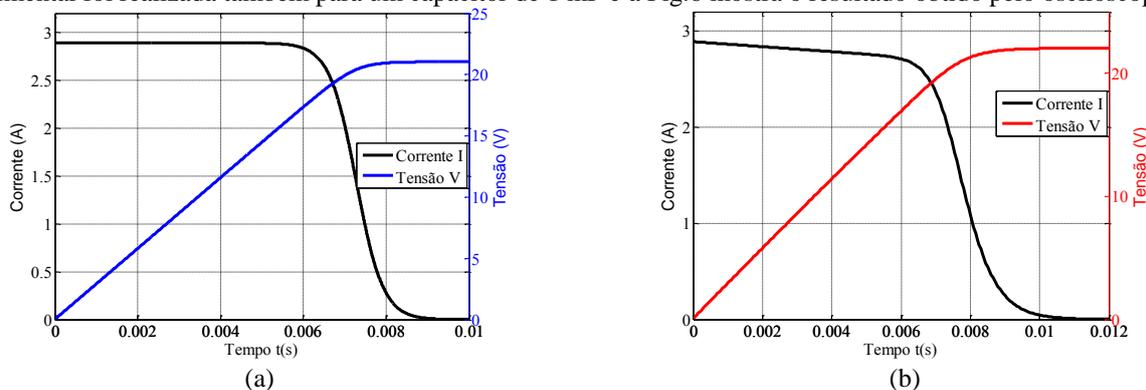


Figura 5 – Evolução da tensão e corrente para o tempo (a) teórico e (b) simulado para um capacitor de 1 mF.

A tensão de circuito aberto estabiliza em 20,2 V e a corrente de curto-circuito possui valor próximo a 2 A. Estas condições, diferentes das nominais, são reflexo das condições nas quais o painel estava operando no momento do teste. A diferença entre a irradiância incidente no painel e a temperatura na qual o mesmo se encontrava resultaram na queda da tensão e corrente, e conseqüentemente, num maior tempo de carga do capacitor, além dos fatores externos que não foram levados em conta na modelagem e determinação do tempo. Para este caso, o tempo de carga do capacitor foi perto de 16,25 ms. Um desses fatores é o regime transitório da corrente nos primeiros instantes de carga do capacitor (aproximadamente 1 ms). Este fato pode ser explicado pelo processo de fechamento da chave mecânica e a presença de indutância parasita dos fios utilizados na medição. Entretanto, a quantificação e análise deste regime transitório não influenciam na caracterização do painel e não serão estudados neste trabalho.

Foram testados experimentalmente cinco valores de capacitância e a Tab.2 indica os tempos de carga teóricos, simulados e experimentais, para cada caso.

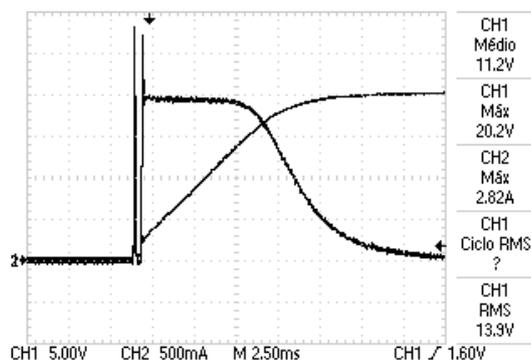


Figura 6 – Evolução da tensão e corrente na montagem experimental para um capacitor de 1 mF.

Tabela 2 – Tempo de carga para cinco valores de capacitância.

Capacitância (μF)	Tempo (ms)		
	Teórico	Simulado	Experimental
100	0,8360	0,9500	2,7500
330	2,7569	3,1500	4,7500
680	5,6800	6,5000	10,6250
1000	8,3530	9,5500	16,2500
2200	18,3769	21,0500	32,5000

Novamente, percebe-se uma proximidade dos valores teóricos e simulados, apresentando em todos os casos, erros relativos entre 12 e 13%. Entretanto os valores experimentais destoam muito dos outros dois, como já era de se esperar, devido às condições climáticas nas quais o painel estava submetido. As considerações feitas no cálculo teórico implicavam na determinação do tempo mais rápido de carga do capacitor e através da análise da Tab. 2 é possível perceber que em todos os casos, o tempo teórico foi menor que o simulado. Este tempo deve ser considerado como crítico, uma vez que suas aproximações desconsideram alguns parâmetros que, na prática, farão com que este tempo seja maior que o calculado. No projeto de caracterização é necessário considerar um tempo maior que o calculado para garantir que todos os pontos da curva sejam captados, garantindo assim o bom funcionamento do processo de caracterização.

Para se compreender melhor como o tempo de carga se comporta para diferentes valores de capacitores, foi traçada uma curva tempo vs capacitância para as condições normais de operação (STC), representada pela Fig.7(a).

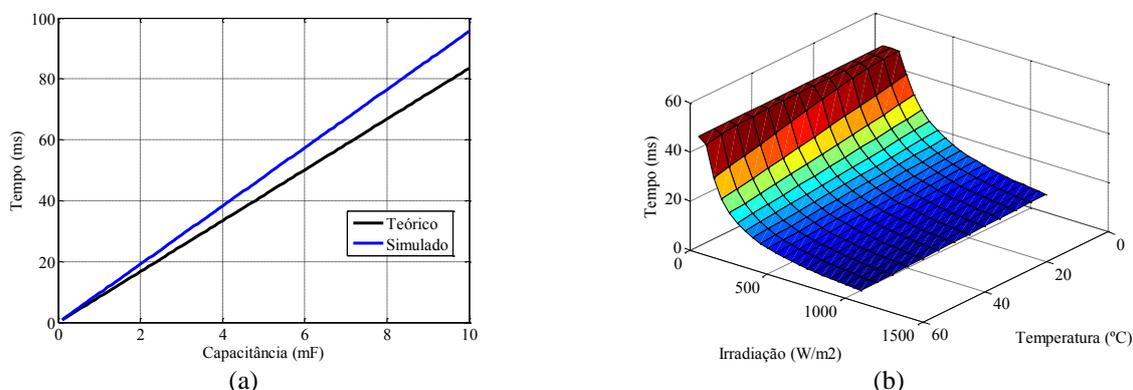


Figura 7 – Curva da capacitância vs tempo, variando de 0,1 a 10 mF (a) e dependência do tempo de carga do capacitor em função da irradiância e da temperatura (b).

Mais uma vez, é possível observar que o tempo teórico é menor que o simulado. A razão entre os coeficientes angulares das duas retas é igual à 0,8731, por isso que o erro entre os dois tempos é sempre entre 12 e 13%.

Segundo a Eq. (16), é esperado que o tempo de carga varie linearmente com a capacitância conectada ao painel. Outra análise importante do tempo é a sua dependência em relação a irradiância incidente no painel e a temperatura na qual ele se encontra. Para isso, foi realizado a Fig.7 (b) onde é possível analisar o comportamento do tempo em função da irradiância e temperatura.

Através da análise da Fig.7 (b) e da Eq. (2), é possível perceber que a medida que a irradiância diminui, a corrente gerada pelo painel também cai, aumentando assim o tempo de carga do capacitor. O mesmo acontece para o aumento da temperatura, apesar de menos significativo que a queda da irradiância.

Por fim, a determinação do tempo de carga do capacitor representa parte fundamental do projeto de caracterização de curvas dos painéis. Uma modelagem incorreta acarreta em imprecisões nas curvas e até o mal funcionamento do instrumento caracterizador. Para se realizar esta modelagem de forma correta, é necessário se fazer uso da Eq. (17) conhecendo-se bem o tempo de aquisição t_{aq} do dispositivo de coleta de dados ou o número n de pontos na curva.

Para ilustrar a diferença entre uma curva mal dimensionada e uma bem dimensionada, em relação ao tempo de carga do capacitor, foi utilizado um caracterizador indicado pela Fig.8 (a). Este protótipo possui sensores que enviam a um microcontrolador PIC18F4550 as leituras de tensão e corrente de um capacitor de 1 mF/ 25V. O PIC, responsável por acionar um IGBT para dar início ao processo de carga do capacitor, envia os dados para um computador remoto através da comunicação USB. Esses dados serão plotados em uma interface gráfica (Fig.8 (b)) que indica as curvas características do painel e todas as variáveis relevantes no processo. Há também um circuito composto por outro IGBT e uma resistência, responsável por descarregar o capacitor para que o processo possa ser reiniciado.

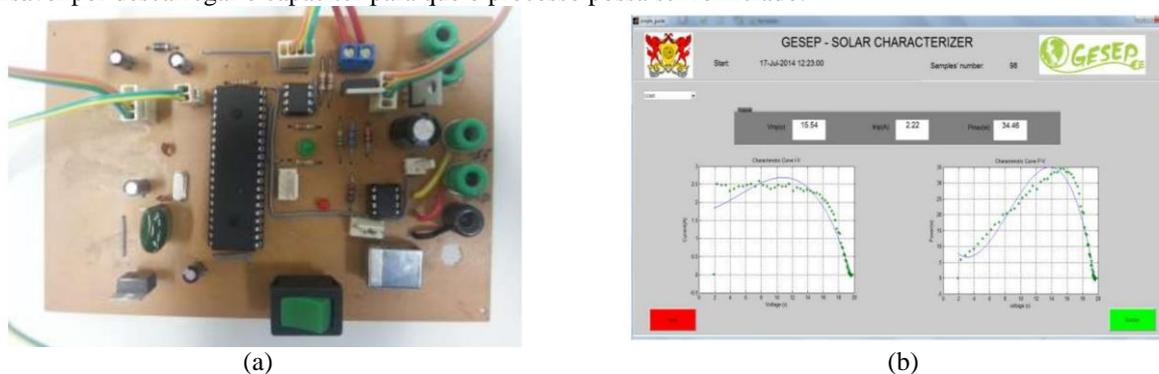


Fig. 1 – Protótipo do caracterizador (a) e interface gráfica (b).

Neste exemplo, o microcontrolador PIC18F4550 foi utilizado para fazer a aquisição dos dados de tensão e corrente do capacitor de 1 mF conectado ao caracterizador. Na Fig. 9 (a), o tempo total de aquisição dos 100 pontos foi de 50 ms, sendo que o capacitor atinge a tensão de circuito aberto em menos de 10 ms, segundo os dados calculados e simulados neste trabalho. É possível perceber que apenas 20% dos pontos encontram-se distribuídos pela curva, enquanto que os outros 80% ficam todos ao redor da tensão de circuito aberto V_{OC} . Na Fig. 9 (b), o tempo de amostragem foi de 15 ms, deixando os 200 pontos melhor distribuídos por toda a curva, e não apenas concentrados em uma única região. Este tempo de amostragem foi escolhido de forma a garantir que todos os pontos estejam dentro da curva, evitando o tempo crítico determinado pelo cálculo teórico. A Fig. 9 (b), além de possuir mais pontos, ainda apresenta melhor distribuição dos mesmos na curva, em relação à Fig. 9 (a). A comparação das duas curvas evidencia uma melhoria na precisão e eficiência da caracterização de curvas quando se é feito um bom dimensionamento do tempo do capacitor através da análise do seu regime transitório. É possível perceber que as curvas não se encontram no mesmo ponto de operação para valores de temperatura e irradiância. Essa discrepância pode ser explicada pela rápida variação destas grandezas no intervalo de um teste para o outro. Todavia, como o objetivo destas curvas é de mostrar a diferença de precisão dos pontos coletados, este fato foi desconsiderado, e os valores de irradiância e temperatura não foram mencionados por falta de instrumentos para as suas medições.

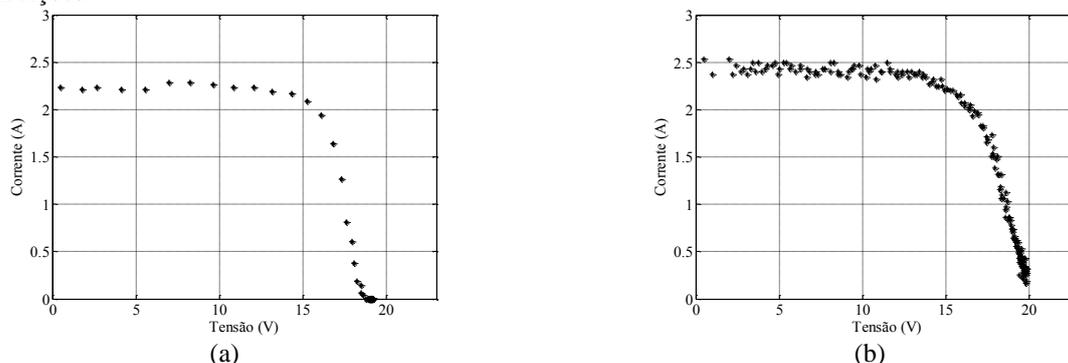


Figura 9 – Curva I-V com $n = 100$ pontos e tempo total de amostragem de dados de 50 ms (a) e curva VxI com $n = 200$ e tempo total de amostragem de dados de 15 ms (b).

O número de pontos na curva também aumenta a sua precisão, mas isso depende da capacidade de armazenamento e processamento do instrumento de coleta de dados. Deve-se tomar cuidado também para que o número de pontos não ultrapasse a necessidade do projeto, para não deixar pontos redundantes. No protótipo utilizado, a utilização de mais de 200 pontos já exigia do microcontrolador mais de 90% de sua memória interna.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposto a análise do regime transitório de um capacitor conectado ao painel para caracterização de suas curvas. Foi realizada uma modelagem matemática com objetivo de determinar o tempo que o capacitor leva para ficar carregado com a tensão de circuito aberto V_{OC} do painel. Devido às simplificações realizadas, foram feitas simulações no MATLAB/Simulink para comparar o tempo teórico aproximado com um modelo completo do painel. Foram realizados testes experimentais para complementar a análise do tempo de carga do capacitor.

Os tempos de carga teóricos e simulados apresentaram erros relativos de 12-13%, justificados pelas aproximações realizadas durante a modelagem. Estes resultados não foram comparados com os resultados experimentais devido à diferença nas condições de operação na qual o painel estava submetido.

O tempo de carga do capacitor é diretamente proporcional ao valor de capacitância conectado ao painel e varia com a irradiância e a temperatura. À medida que a radiação cai ou a variação de temperatura aumenta, ocorre uma queda na corrente gerada, o que ocasiona um aumento no tempo de carga do capacitor.

O bom dimensionamento do tempo de carga do capacitor é útil no projeto de caracterização das curvas dos painéis, uma vez que este implica diretamente no projeto do instrumento ou dispositivo de aquisição de dados. Além deste tempo, é necessário conhecer o tempo mínimo de aquisição de dados do dispositivo e o número de pontos desejados na curva, para poder traçá-la de forma eficiente e precisa.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. (2012). *Resolução Normativa 482*. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ANEEL. (2015). *REN nº 482/2012 Cenário atual e propostas da AP 26/2015*. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- BIG. (24 de 01 de 2016). Fonte: ANEEL: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>
- Brito, E. M. (2014). Construção de um caracterizador solar baseado em carga capacitiva. *Trabalho final de curso*. Viçosa: UFV.
- Bühler, A. J. (2007). Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação. *Dissertação de mestrado*. Porto Alegre: UFRS.
- Campos, E. L. (2013). Construção de um caracterizador de curvas de painéis solares utilizando um conversor boost. *Trabalho final de curso*. Viçosa: UFV.
- Donovan, M., Bourne, B., & Roche, J. (2010). Efficiency VS. irradiance characterization of PV modules requires angle-of-incidence and spectral corrections. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE*, (pp. pp.002301-002305, 20-25).
- Duran, E., Piliouguine, M., Sidrach-de-Cardona, M., Galan, J. A., & Marquez, J. M. (2008). Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review. *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC*. San Diego: IEEE Xplore.
- Junior, J. U. (2015). Energia solar fotovoltaica e o desempenho do SFVCR do escritório verde da UTFPR. *Instituto de Engenharia do Paraná*.
- Mahmoud, I., Abdellatif, S., Abdel-salam, T., Bayoumi, A., Sahbel, A., & Abdellatif, O. (2014). Experimental characterization for a PV module using low cost method. *Engineering and Technology (ICET), 2014 International Conference*, (pp. pp.1-4, 19-20).
- Mahmoud, M. (2006). Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics. *Renewable Energy*.
- Malta, A. L. (2013). Comparação de algoritmos de máxima potência em sistemas fotovoltaicos como carregador de baterias. *Trabalho final de curso*. Viçosa: UFV.
- Markvart, T., & Castañer, L. (2003). *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier.
- Muñoz, J., & Lorenzo, E. (2004). Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. *European Solar Conference (EuroSun 2004)*, (pp. 1489–1497).
- Nashelsky, L., & Boylestad, R. (1996). *Electronic devices and circuit theory, 6th ed*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Rauschenbach, H. S. (1980). *Solar cell array design handbook - The principles and technology of photovoltaic energy conversion*.
- REN21. (2015). *Renewables 2015 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Villalva, M. G. (2010). Conversos eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. *Tese de doutorado*. Campinas: UNICAMP.

CURVE CHARACTERIZATION FOR PV PANELS BASED ON CAPACITIVE LOAD: TRANSIENT ANALYSIS OF CAPACITOR

Abstract. *With the increasing demand for electricity and the investment in photovoltaic systems in Brazil and in world, the development and improvement of this technology becomes more and more important. The characterization of solar panels curves is an important tool for analyzing the behavior and efficiency in standard and operating conditions. The analysis of the I-V curves provides the evaluation of solar panel's performance under different climatic conditions, showing relevant variables, like irradiance, temperatures and shading conditions. There are several methods to trace the I-V curves of the panels. One of the most efficient is a capacitive load used for varying electrical variables and data acquisition of curve points. This paper aims to determine the time required to fully charge the capacitor and the ideal capacitance value for each input power. Charging process' times were calculated based on capacitor modeling and the results were compared with solar panel's simulations using MATLAB / Simulink. The calculated times has relative errors equal to 12-13% compared to simulated times. It was concluded that the capacitor charging times depend on the connected capacitance, the irradiance and panel's temperature.*

Key words: *Curves characterization, photovoltaic systems, capacitive load, charging process' time.*