

CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA UNA CENTRAL CONECTADA A LA RED

Krenzinger, A. y Prieb, C.W.M.
Laboratório de Energia Solar/Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Sarmento Leite, 425 Porto Alegre RS Brasil 90050-170
arno@mecanica.ufrgs.br, cprieb@ufrgs.br,

RESUMEN: En este trabajo se presenta la metodología y criterios empleados para la clasificación y selección de módulos fotovoltaicos utilizados en una central conectada a la red de distribución. La central fotovoltaica está integrada a la fachada del Laboratório de Energia Solar de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul en Porto Alegre, Brasil, y es constituida por 48 módulos de 100 Wp/24V, totalizando 4.800 Wp. Los módulos utilizados fueron elegidos de un total de 57 módulos adquiridos para el proyecto. La selección ha sido hecha a partir de la caracterización individual de cada uno de los módulos. Con los datos medidos ha sido posible combinar los módulos en grupos para buscar el máximo resultado energético, asociando cada *string* serie primero por un criterio de corrientes en el punto de máxima potencia y luego asociando los pares de *strings* en paralelo de acuerdo con los voltajes en el punto de máxima potencia.

PALABRAS CLAVE: Energía solar, módulo fotovoltaico, central fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN

Un módulo fotovoltaico es capaz de convertir energía solar en energía eléctrica en un rango de potencias muy limitado. Para tener una instalación con mayor potencia los módulos fotovoltaicos deben ser asociados en *arrays*. Al asociar módulos fotovoltaicos en serie el voltaje del *array* queda igual a la suma de las tensiones de cada módulo. Al asociar los módulos en paralelo la corriente del *array* queda igual a la suma de las corrientes que circulan en cada *string* del *array*. Si todos los módulos de un sistema fotovoltaico fueran exactamente iguales, la potencia resultante sería obtenida del producto de la potencia individual por el número de módulos del *array*. Sin embargo eso no es así. Los módulos fotovoltaicos son productos de manufactura en fabricas y, como todos los otros productos industriales, nunca son exactamente iguales. Hay una dispersión de parámetros que hace que la asociación de módulos elegidos al azar pueda resultar significativamente peor que módulos seleccionados según criterios especiales. Esto se ha estudiado con diferentes metodologías por Bucciarelli (1979) y por Chamberlin et al. (1995), por ejemplo. Zilles (1993) hace un profundo estudio del efecto de la dispersión de los parámetros en *arrays*.

Este trabajo presenta la selección de módulos para una central fotovoltaica integrada en el edificio del Laboratório de Energia Solar de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul. La central fue financiada por la Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), una empresa de generación y distribución de electricidad del Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A través de una licitación internacional fueron adquiridos 57 módulos fotovoltaicos modelo I-100/24, fabricados por Isofotón. Segundo datos del fabricante, estos módulos son capaces de suministrar 100 W bajo las condiciones estándar (irradiancia de 1000 W/m² y 25 °C de temperatura de celda). El generador está formado por tres *sub-arrays* de dieciséis módulos. Cada *sub-array*, a su vez constituido por dos *strings* de ocho módulos conectados en paralelo, alimenta un inversor monofásico con 1000 W nominales y potencia máxima de 1100 W. Las salidas de los tres inversores están conectadas en triangulo y entregan la energía convertida a la red trifásica en 220 V. En la Fig. 1 es presentado un diagrama esquemático de la instalación.

Los módulos fueron ensayados individualmente para una rigurosa clasificación. Estos ensayos se han hecho en dos etapas. Primeramente fueron analizados en mayor profundidad dos módulos del lote, con ensayos en temperatura estándar (con sistema de refrigeración). Estos datos fueron importantes para determinar los parámetros de corrección de las curvas de los demás módulos. En secuencia fueron ensayados todos los módulos (incluso los dos iniciales) pero ahora en condiciones naturales, con irradiancia solar próxima a los 1000 W/m² y en la temperatura en que el módulo se ha estabilizado térmicamente en el momento de la medida. Este procedimiento ha posibilitado una mayor agilidad en los ensayos, incluso garantizando una mayor aproximación de los datos característicos con las condiciones reales de operación.

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Los módulos fotovoltaicos son los elementos responsables por la conversión de la energía solar en electricidad y es a partir del análisis de su curva característica corriente versus voltaje (curva *I-V*) que son obtenidos los principales parámetros que definen su comportamiento eléctrico. Para la determinación de la curva característica de módulos fotovoltaicos fue utilizada una bancada de testes desarrollada en el Laboratório de Energia Solar de la UFRGS, cuyo diagrama esquemático se muestra en la Fig. 2. El sistema es constituido básicamente por una carga electrónica que polariza el módulo en diversos puntos de operación, partiendo desde antes del corto circuito, pasando por el cuadrante de generación y hasta después del circuito abierto. Al mismo tiempo tres multímetros miden el voltaje en los bornes del módulo, la corriente que lo atraviesa y la irradiancia en el plano del ensayo. La corriente es medida a partir de la caída de voltaje a través de un resistor *shunt*

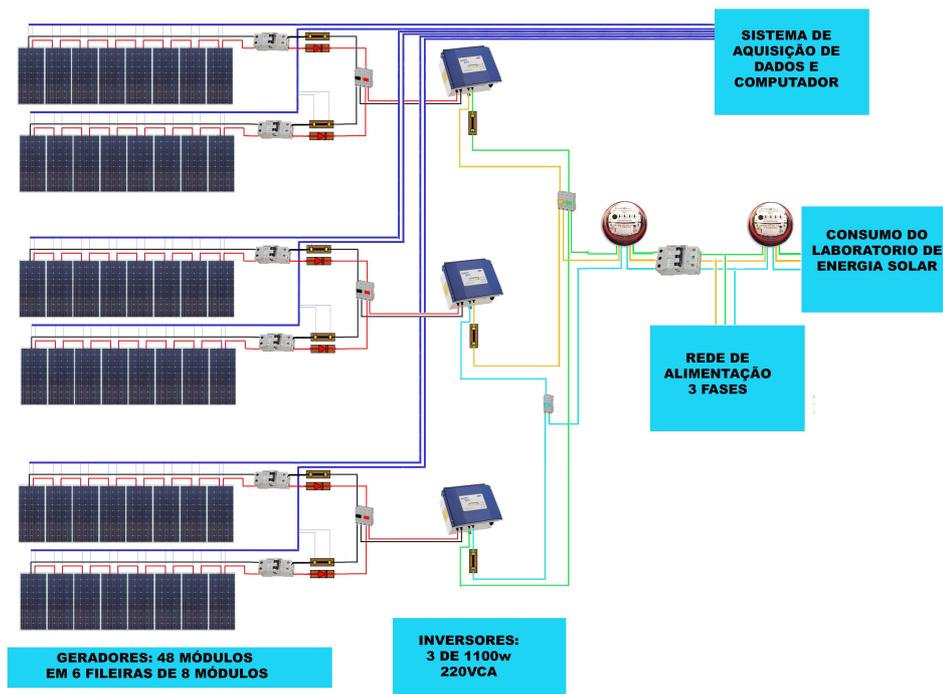


Figura 1: Diagrama esquemático de la instalación.

calibrado. La irradiancia es medida a partir de una celda solar calibrada, de la misma tecnología del módulo en testeo. La temperatura es medida por una termocupla pegada a la cara posterior del módulo. Todo el sistema es controlado por un ordenador ejecutando un *software* también desarrollado en el Laboratorio. Un total de 512 puntos de la curva característica son adquiridos en aproximadamente 1,5 segundos. Mayores detalles del sistema se encuentran en Prieb (2002).

Después de completar las mediciones, los ficheros de datos sufren un procesamiento que permite calcular con precisión una serie de parámetros, los cuales serán necesarios para trasladar una curva medida a condiciones distintas de radiación y temperatura. A continuación son presentadas las etapas de este trabajo computacional. El programa desarrollado en el Laboratorio ha sido ya presentado por Krenzinger (2004) y tiene un conjunto de subrutinas de apoyo, entre las que se encuentra una para ajustar una recta a partir de un número de puntos dados y que será descrita en los próximos párrafos.

Determinación de la corriente de corto circuito

A través de un barrido leyendo los datos, el programa identifica cual es el índice del punto en el cual hay inversión de la señal de voltaje. El primer punto de voltaje positivo es reunido a los próximos nueve puntos y sus coordenadas son remitidas a la subrutina de ajuste lineal, retornando los coeficientes de la recta ajustada con los puntos. La ecuación de la recta permite identificar para el punto $V=0$, el valor de corriente de corto circuito (I_{SC}) medido, es decir, siendo **a** y **b** respectivamente los coeficientes lineal y angular de la recta ($y = \mathbf{a} + \mathbf{b} x$), $I_{SC} = \mathbf{a}$.

Determinación del voltaje de circuito abierto

A través de un barrido de lectura de los datos, el programa identifica cual es el índice del punto en el cual hay inversión de la señal de corriente. El primer punto con corriente negativa es reunido a los próximos nueve puntos y además a los diez puntos anteriores y sus coordenadas son remitidas a la subrutina de ajuste lineal, retornando los coeficientes de la recta ajustada con los puntos. La ecuación de la recta permite identificar para el punto $I=0$, el valor del voltaje de circuito abierto (V_{OC}) medido: siendo **a** y **b** respectivamente los coeficientes lineal y angular de la recta ($y = \mathbf{a} + \mathbf{b} x$). Así

$$V_{OC} = -\frac{\mathbf{a}}{\mathbf{b}} \quad (1)$$

Determinación de la resistencia paralela

Se puede demostrar que la pendiente de la curva $V(I)$ próximo al punto de corto circuito tiene el valor de la resistencia paralela:

$$R_p = 1 - \left. \frac{\partial V}{\partial I} \right|_{V=0} \quad (2)$$

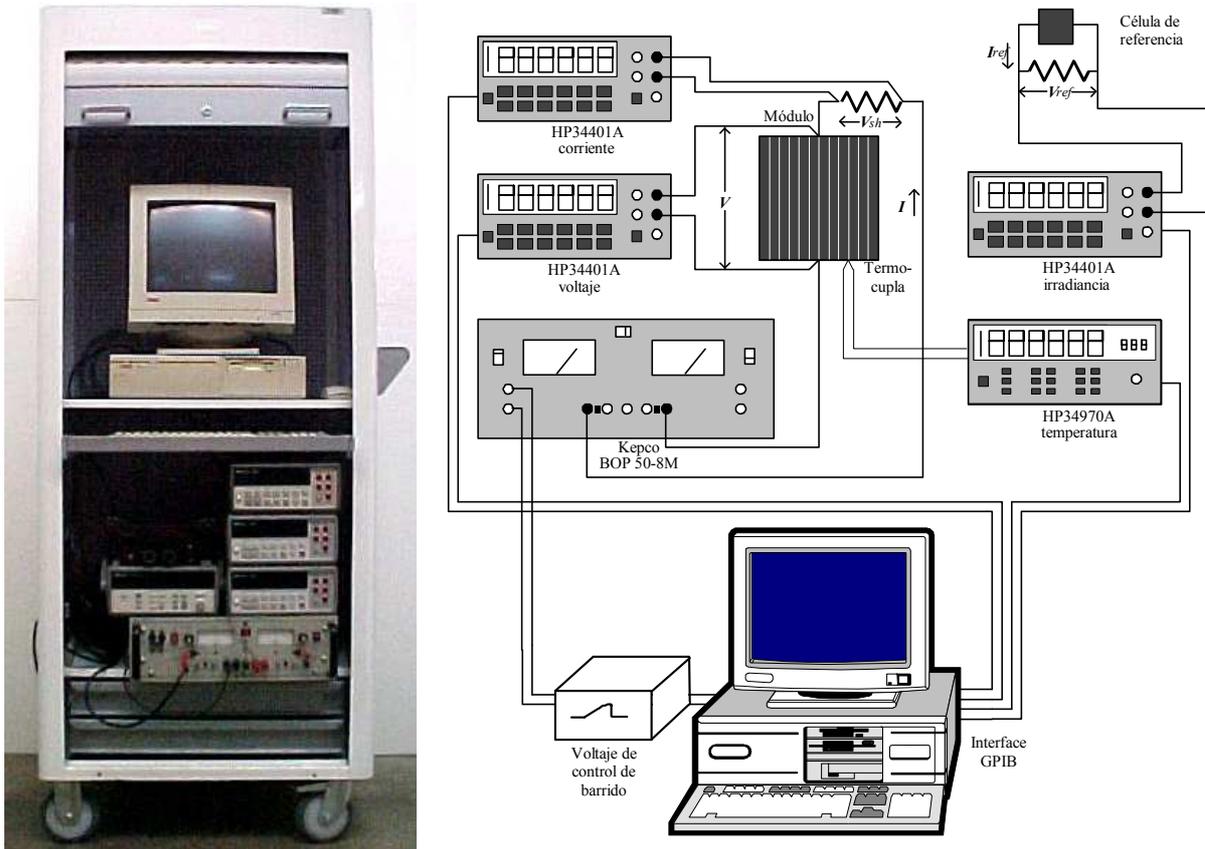


Figura 2: Equipo utilizado para la determinación de las curvas características de los módulos fotovoltaicos.

Para obtener la pendiente de la curva, una secuencia de diez valores de V y I es seleccionada y remitida a la subrutina de ajuste lineal, siendo la inclinación de la recta resultante utilizada para establecer el valor de R_p , es decir, siendo \mathbf{a} y \mathbf{b} respectivamente los coeficientes lineal y angular de la recta ($y = \mathbf{a} + \mathbf{b} x$), donde y es la corriente y x es el voltaje. Como \mathbf{b} es muy pequeño, la expresión anterior puede ser aproximada para:

$$R_p = -\frac{1}{\mathbf{b}} \quad (3)$$

Determinación de la resistencia serie

También el valor de R_s puede ser obtenido a partir da pendiente de la curva $I(V)$, pero ahora en el punto de circuito abierto.

$$R_s = -\left. \frac{\partial V}{\partial I} \right|_{V=V_{oc}} - \frac{V_T}{I_{sc}} \quad (4)$$



Figura 3: Módulos fotovoltaicos siendo ensayados

Siendo **a** y **b** respectivamente los coeficientes lineal e angular de la recta ($y = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot x$), donde y es la corriente y x es el voltaje, resulta que

$$R_s = -\frac{1}{\mathbf{b}} - \frac{V_T}{I_{SC}} \quad (5)$$

Determinación del punto de máxima potencia

Un polinomio de tercer orden fue utilizado para determinar el punto de máxima potencia. El conjunto de puntos medidos va a ofrecer un par de valores (V, I) que corresponderá al producto $P = V \cdot I$ de mayor valor. Sin embargo la elección de este valor para representar el punto de máxima potencia puede ser peligrosa, ya que cada conjunto individualmente es afectado por ruidos e incertidumbres de las mediciones. La tarea de determinar el punto exacto correspondiente a la máxima potencia queda muy facilitada utilizando un polinomio, ajustado a los puntos medidos, que pueda representar el comportamiento de la curva de forma que se encuentre su valor máximo y utilizar el mismo. Por el análisis de conjuntos de puntos medidos se ha determinado que un polinomio de tercer grado tiene características adecuadas y suficientes para un ajuste de muy buena calidad. Antes de procederse a la generación del polinomio, otra subrutina determina cuál es el índice del punto medido donde el producto $V \cdot I$ es máximo. A continuación el programa procura los índices de los puntos vecinos donde el voltaje es 7% menor y 7% mayor que el voltaje del punto correspondiente a la máxima potencia. Estos son los puntos inicial y final para enviar a la subrutina de interpolación. El número de puntos entre los valores inicial y final es determinado, ya que este es un argumento de la función que genera el polinomio. El retorno de la subrutina es un vector con cuatro valores (U_0, U_1, U_2, U_3) que permite calcular la potencia en este intervalo de voltajes a través de la ecuación (4):

$$P(V) = U_0 + U_1 \cdot V + U_2 \cdot V^2 + U_3 \cdot V^3 \quad (6)$$

Determinación del voltaje de máxima potencia

El voltaje correspondiente a la potencia máxima queda fácilmente determinado igualando a cero la derivada de la función $P(V)$:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = U_1 + 2U_2 \cdot V + 3U_3 \cdot V^2 = 0 \quad (7)$$

o

$$V_{\max} = \text{Max} \left[\frac{-2 \cdot U_2 + \sqrt{4U_2^2 - 12U_3U_1}}{6U_3}, \frac{-2 \cdot U_2 - \sqrt{4U_2^2 - 12U_3U_1}}{6U_3} \right] \quad (8)$$

Determinación de la corriente de máxima potencia

Para encontrarse la corriente correspondiente al mismo voltaje, primeramente se calcula la potencia aplicando la Ecuación (6) al valor V_{\max} e se divide por este mismo valor:

$$I_{\max} = \frac{P(V_{\max})}{V_{\max}} \quad (9)$$

Con estos parámetros determinados es posible trasladar con precisión las curvas de una condición a otra.

METODOLOGÍA Y CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN

El número de 48 módulos constituyentes del *array* ya estaba definido como una consecuencia natural de factores tanto de orden físico (la anchura de la fachada del Laboratorio) como de orden eléctrico/algebraico: los inversores eran en número de tres y el voltaje de ocho módulos de 24 V nominales en serie era compatible con el voltaje de entrada de los mismos. Así se ha decidido que el generador sería constituido por tres *sub-arrays*, cada uno con dos *strings* de ocho módulos en paralelo.

El objetivo de la clasificación de los módulos fotovoltaicos era elegir cuales de los 57 módulos del lote iban a ser parte del generador. Para compararlos era necesario que las curvas $I-V$ estuviesen referidas a condiciones comunes de irradiancia y temperatura de celda. Para esto fue elaborado un procedimiento para hacer un posterior procesamiento de los datos medidos, que ha resultado en un programa de ordenador. En este caso todas las curvas medidas fueron llevadas a la condición de 1000 W/m² y 55 °C, representando respectivamente la irradiancia solar y la temperatura de las celdas. Fue entendido que esta condición de temperatura, para los objetivos de la clasificación, es más significativa que la condición estándar. Además, como los módulos se han estabilizado en temperaturas cercanas a esta, se han minimizado los errores inherentes a la corrección por temperatura. Detalles del programa pueden ser encontrados en Krenzinger, 2004.

Módulos fotovoltaicos de un lote, aunque de misma marca y modelo, no son idénticos entre sí. Esto es consecuencia de diversos factores resultantes, principalmente, de los procesos de fabricación. Así, debido a la dispersión de sus parámetros eléctricos, la asociación de módulos presume pérdidas de potencia. Además es sabido que la corriente generada por una

asociación serie de dispositivos fotovoltaicos es limitada por la corriente de la peor celda (la de menor corriente). En otras palabras, la corriente de la asociación no será mayor que la menor corriente de los módulos que la constituyen, de forma que resulta en desperdicio de corriente (y, por resultado, de potencia) asociar en serie módulos de distintas corrientes. Hay que, entonces, buscarse una topología adecuada, que permita minimizar estas pérdidas por asociación.

Tras concluidas las medidas de los 57 módulos y un posterior examen minucioso de las curvas y resultados numéricos, fueron relegados los dos mejores módulos del lote (para servir como referencia en comparaciones y estudios posteriores) y los siete de corriente más baja o que presentaban distorsiones en la curva característica. Así los 48 módulos seleccionados fueron divididos en seis clases teniendo como criterio la corriente en el punto de máxima potencia, ya que se espera que los *sub-arrays* funcionen en esta región como consecuencia de la actuación de los seguidores del punto de máxima potencia incorporados a los inversores. Los ocho módulos de cada clase son así conectados en serie, formando un *string*. A seguir fueron sumados los voltajes en el punto de máxima potencia de los módulos constituyentes de cada *string*, como una aproximación del voltaje de máxima potencia del *string*. Fueron conectados en paralelo dos a dos aquellos *strings* cuyos voltajes en el punto de máxima potencia eran más semejantes.

En la Fig. 3 se muestran los histogramas de la distribución de las corrientes en el punto de máxima potencia y de las potencias máxima de los módulos. La línea vertical indica la potencia (de 86,5 W) que un módulo hipotético, de las mismas características que los módulos analizados y que produzca 100 W en las condiciones estándar, produciría a una irradiancia de 1000 W/m² y 55 °C de temperatura de celda.

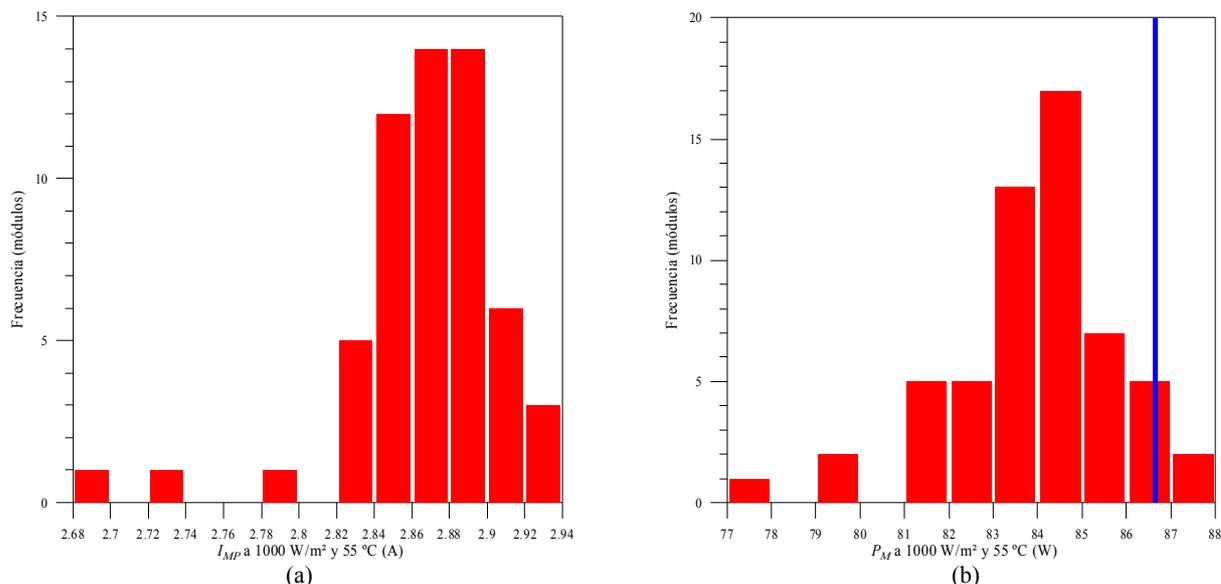


Figura 3: (a) histogramas de la distribución de las corrientes en el punto de máxima potencia y (b) de las potencias máximas de los módulos.

RESULTADOS

La tolerancia de potencia indicada por el fabricante es de $\pm 5\%$. Se puede observar, aunque no esté en los objetivos de este trabajo, que la mayoría de los módulos (42 de los 57) presentan potencias máximas entre la nominal y la nominal menos 5%. Diez presentan potencias abajo del límite inferior de tolerancia y solamente cinco tienen potencia superior a la nominal. Por otro lado hay que considerar la incertidumbre de las determinaciones experimentales de nuestro laboratorio, que tiene un valor cercano al $\pm 2\%$, es decir, tampoco se puede garantizar el resultado mencionado de forma tan contundente.

Los resultados de distribución para corriente, voltaje y potencia son distintos. Para hacer la distribución ideal se ha tenido que jugar con diferentes posibilidades de combinación de módulos. Como solución general se ha aplicado la metodología antes descrita, haciendo con que los módulos de misma (aproximadamente) corriente de máxima potencia estuviesen en un mismo *string* y luego conectando este *string* con otro que resultara en el mismo voltaje de máxima potencia. Para estudiar los efectos de estas combinaciones se ha utilizado un software denominado CREARRAY (Krenzinger, 2001). Este software permite programar individualmente cada uno de los módulos en un *array* y retorna la curva característica resultante. Al distribuir los módulos de forma aleatoria siempre ocurre la posibilidad de conectar un módulo de corriente alta en serie con un módulo de corriente más baja, resultando en una degradación en el desempeño del *array*. Cuando se hizo este estudio, se ha verificado que el *array* con módulos seleccionados presenta un 2,5% de ganancia en la potencia con respecto a posibilidades de conexión con módulos cogidos al azar es equivalente a la potencia de un módulo a más en el sistema.

Para ilustrar este hecho, se presenta en la Fig. 4 un gráfico con dos curvas características en las condiciones estándares de medida, simulados a través del software CREARRAY. Las curvas presentadas son para uno de los *sub-arrays* constituido por dos *strings* de ocho módulos cada. La línea continua representa el resultado con módulos seleccionados y la línea de trazos representa la curva que el *sub-array* tendría si los módulos fuesen escogidos aleatoriamente. Aunque los dos *strings* estén

formados por módulos de misma marca y modelo, las diferencias individuales producen una diferencia significativa en la resultante.

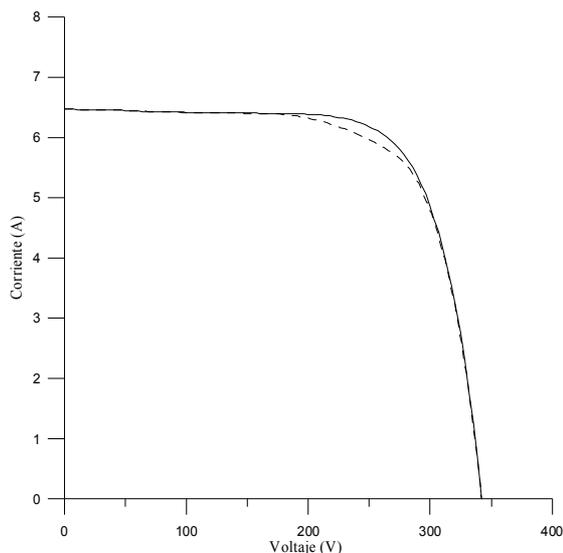


Figura 4: Curvas simuladas de un sub-array con módulos seleccionados (línea continua) y elegidos al azar (línea de trazos).

CONCLUSIONES

Se ha presentado la metodología para la selección de módulos fotovoltaicos que ha sido utilizada en el Laboratorio de Energía Solar de la UFRGS para formar un sistema conectado a la red de distribución. El equipo de determinación de la curva característica y las técnicas de medir y procesar los datos medidos fueron también presentados. Los módulos han sido combinados según el criterio propuesto y de esto se ha logrado un 2,5% más en potencia (y por consecuencia en energía) con respecto a la potencia del mismo sistema si no fuera realizada la selección.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de la Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul (CEEE) e al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por el financiamiento de la investigación.

REFERENCIAS

- Buciarelli Jr., L.L (1979). Power Loss in Photovoltaic Arrays Due to Mismatch in Cell Characteristics. *Solar Energy* 23, 4. 277-288.
- Chamberlin, C.E., Lehman, P., Zoellick, J. y Pauletto, G. (1995). Effects of Mismatch Losses in Photovoltaic Arrays. *Solar Energy* 54,3. 165-171.
- Zilles, R. (1993). Modelado de Generadores Fotovoltaicos: Efectos de la Dispersión de Parámetros. Tesis Doctoral. Escuela Técnica de Ingenieros de Telecomunicación-Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Krenzinger, A. (2004). Programa de Pós-Processamento de Dados Para Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. Libro de Actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Vigo, España. 763-768.
- Prieb, C.W.M. (2002). Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS Brasil.
- Krenzinger, A. (2001). An Algorithm for PV Array Analysis. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich, Germany (CD-ROM).

ABSTRACT: This work presents the methodology and criteria used for classifying and selecting the modules to be used in a grid-connected photovoltaic plant. This plant is integrated to the building of the Laboratório de Energia Solar of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul in Porto Alegre, Brazil, and is constituted by 48 modules of 100 Wp/24V. The employed modules were chosen from a batch with 57 modules. The selection was made through the individual characterization of each module. After the analysis of the measured data, the modules were associated aiming the best energetic performance. Each string was formed with modules sharing similar currents at the maximum power point. After this the strings were paralleled in pairs according to their voltages at the maximum power point.