

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES, CORRENTES E POTÊNCIAS, EM UMA ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

Giuliano Arns Rampinelli – giulianorampinelli@gmail.com

Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

3.6 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Resumo. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de energia elétrica estão sendo muito estudados por apoiarem o sistema interligado nos momentos de alta demanda de energia. Portanto é importante conhecer o comportamento desses sistemas e o seu impacto sobre a rede elétrica. Este trabalho apresenta uma análise da distribuição de tensões em uma instalação fotovoltaica de 4800 W_p conectada à rede de distribuição de energia elétrica. A instalação foi dividida em três subsistemas onde cada um possui 16 módulos de 100 W_p com células de silício monocristalino, organizados em dois painéis de oito módulos em série, conectados dois a dois em paralelo e inversores de 1000 W na saída. O subsistema 1 teve três módulos com células sombreadas, o subsistema 2 teve dois módulos desconectados do arranjo, enquanto o subsistema 3 não sofreu nenhuma alteração em sua associação. O monitoramento das tensões, correntes e potências dos subsistemas, permitem a análise da instalação em diferentes situações de funcionamento da mesma. Condições diferentes de operação de um subsistema não afetam os outros dois. Situações em que a instalação está em circuito aberto, curto circuito ou sombreamento representam perdas de energia. Por fim, com o auxílio de um programa são comparados dados experimentais e simulados. A análise mostrou concordância nas diferentes condições de operação do sistema.

Palavras-chave: Energia Solar, Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, Módulo Fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas fotovoltaicos interligados à rede são instalados de forma que, toda a energia solar convertida em energia elétrica em corrente alternada seja entregue à rede elétrica. O conhecimento do impacto desses sistemas na rede elétrica é de fundamental importância. Faz-se necessário conhecer o comportamento das tensões em todas as possíveis situações de funcionamento do sistema, como condição de circuito aberto, curto circuito e sombreamento. Em um sistema com mais de um módulo tem-se um problema de perdas por associação, denominado *mismatch loss*. Efeito estudado por diversos autores (González, 1986; Chamberlin et al, 1995). Esse efeito corresponde à diminuição da potência total do sistema quando comparada com a soma das potências individuais de todos os módulos que compõem a instalação devido às diferenças elétricas entre os mesmos e possíveis sombreamentos. A possibilidade de degradação dos módulos que compõem a instalação pode aumentar significativamente, dependendo do tipo de ligações existentes, com o sombreamento de apenas uma célula de um módulo, fazendo com que a corrente do sistema diminua e conseqüentemente a potência do mesmo. Em casos extremos, toda a potência gerada pelo sistema pode ser perdida pelo simples fato de se ter uma célula sombreada ou com defeito. Dessa forma é importante garantir o máximo aproveitamento possível da energia solar disponível evitando esse sombreamento de células de módulos que compõem a instalação. O sombreamento de células pode ser ocasionado por diversos fatores, como sujeira acumulada ao longo do tempo, folhas que caem sobre os módulos, árvores, prédios ou estruturas próximas à instalação que proporcione sombra durante um período do dia e principalmente no amanhecer e entardecer. Para evitar danos ao sistema em decorrência dessas si-

tuações, são instalados dispositivos de proteção. Entre os dispositivos, os mais difundidos e estudados são os diodos de *bypass* e de bloqueio (Wiles e King, 1997).

2. FUNDAMENTAÇÃO

Uma célula fotovoltaica quando exposta à luz gera uma corrente elétrica diretamente proporcional à radiação incidente. A completa caracterização de uma célula ou módulo fotovoltaico passa pela determinação da curva característica que deve ser obtida obedecendo alguns critérios estabelecidos pelas normas técnicas. Parâmetros como corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, tensão e corrente de máxima potência são obtidos a partir da curva característica. É desejável e de interesse que o módulo opere permanentemente em condição de máxima potência, no objetivo de maximizar a energia gerada do sistema.

Para construir sistemas fotovoltaicos com potências elevadas, faz-se necessário associar módulos em série e paralelo com o objetivo de obter valores de tensão e corrente apropriados para a aplicação que se deseja. As diferenças entre as características elétricas dos módulos e possíveis sombreamentos de células podem ocasionar perdas na geração de energia elétrica, ou mesmo danos ao sistema. Para evitar problemas oriundos dessas situações indesejadas, mas que ocorrem ao longo da vida útil do sistema, deve-se acrescentar dispositivos de proteção, geralmente diodos, que são colocados em pontos estratégicos da instalação (Hecktheuer, 2001).

Os módulos fotovoltaicos, geralmente, são formados por um determinado número de células associadas em série. Uma célula que estiver sombreada pode funcionar como carga para as demais células ocasionando uma dissipação exagerada de potência sobre ela e, por consequência, provocando um aquecimento que pode causar danos à célula. Esse fenômeno é conhecido como *hot-spot heating* (pontos quentes) e é abordado por diversos autores (Bhattacharya et al, 1991; Schmid et al, 1998). Para evitar essa situação são conectados em anti paralelo com as células um diodo conhecido como diodo de *bypass*. Quando a célula não tem problema de identidade em relação às demais e não estiver sombreada, o diodo *bypass* encontra-se reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente elétrica. No entanto, quando uma célula estiver sombreada, o mesmo encontra-se diretamente polarizado e, portanto, permitindo que por ele circule corrente. Neste caso, a célula sombreada não gera energia elétrica, mas também não se comporta como carga para as demais células. Na prática, os diodos de *bypass* não estão conectados em anti paralelo com cada célula associada, mas sim com grupos de células. Sistemas fotovoltaicos constituídos por painéis (formado por N módulos associados em série) ligados em paralelo podem ser protegidos contra correntes reversas de outros painéis através de diodos de bloqueio conectados em série em cada um dos painéis. Essa corrente reversa é causada pela diferença de tensão entre os painéis devido às situações indesejadas citadas anteriormente. O painel que apresenta uma menor tensão pode se comportar como carga para os demais painéis. Desta forma, parte ou toda corrente gerada pelos painéis que apresentem maior tensão fluirá pelo painel de menor tensão, ocasionando um aquecimento neste último e perda de potência do sistema. O uso de diodos de bloqueio ligados em série com os módulos de cada painel evita o aparecimento de correntes reversas. Em sistemas fotovoltaicos que apresentam associações de módulos em série e paralelo, a proteção dos geradores é conseguida utilizando-se, simultaneamente, diodos de *bypass* e bloqueio.

3. INSTALAÇÃO

No Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) foi montado um sistema fotovoltaico conectado à rede. A instalação é composta de três subsistemas independentes (leste, centro e oeste) formados por 16 módulos de células de silício monocristalino de $100W_p$ na condição padrão ($1000W/m^2$ e $25^\circ C$) e tensão nominal de 24V e que estão organizados em dois painéis de oito módulos ligados em série e conectados dois a dois em paralelo. Cada módulo foi ensaiado e caracterizado individualmente pela equipe do laboratório (Hecktheuer et al., 2002). Cada subsistema está conectado na entrada de um inversor monofásico com potências nominal e

máxima AC, de respectivamente, 1000W e 1100W. A potência máxima DC de entrada do inversor é de 1210W e em condições de operação a potência de cada módulo é inferior a 100W. Em sistemas fotovoltaicos recomenda-se que a potência instalada seja superior a potência do inversor. As saídas dos inversores foram conectadas em triângulo, de forma a distribuir simetricamente entre as três fases a energia entregue a rede elétrica. A instalação fotovoltaica está sendo acompanhada ao longo do tempo mediante um sistema de aquisição de dados via computador (Dias, 2006).

Os módulos do sistema fotovoltaico são compostos por 72 células, ligadas em série, de silício monocristalino de $100W_p$ e tensão nominal de 24V. Cada módulo apresenta três diodos de *bypass* não entrelaçados, onde cada um está ligado em anti paralelo com 24 células. Há um diodo de bloqueio por painel. A tensão reversa de funcionamento do módulo está limitada em 2,1V, impedindo que as células individualmente dissipem uma grande quantidade de potência. O painel superior leste é denominado ES, enquanto o painel inferior leste é denominado EI. Da mesma forma os painéis centrais, superior e inferior, são denominados respectivamente, CS e CI. Por fim, os painéis com localização oeste, são denominados WS e WI. A Fig. 1 é uma representação do sistema fotovoltaico do laboratório de energia solar da UFRGS.

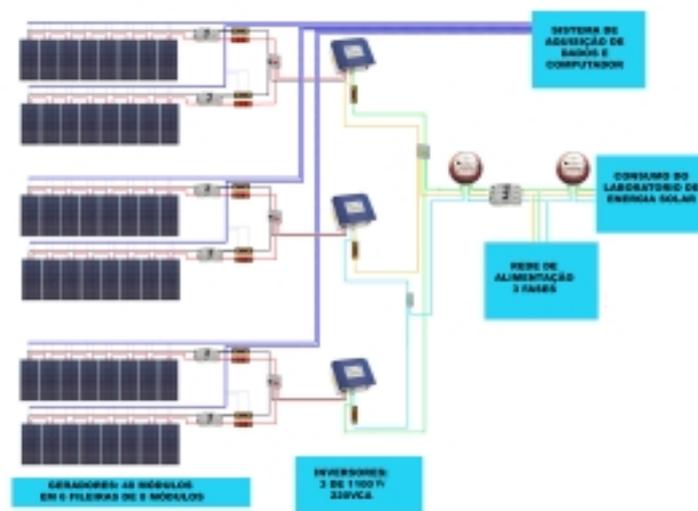


Figura 1 – Ilustração das ligações elétricas do sistema fotovoltaico.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O presente trabalho se destina ao monitoramento da instalação fotovoltaica, formada por seis painéis de oito módulos ligados em série e associados dois a dois em paralelo. O sistema de aquisição de dados registra as medidas das tensões individuais de cada módulo dos painéis, superior e inferior, de localização leste, as tensões e correntes de cada um dos seis painéis, as irradiâncias medidas em duas células, superior e inferior, no plano gerador, que forma um ângulo de 30° com o plano horizontal, a temperatura ambiente e a temperatura dos módulos do sistema.

Para a análise do comportamento da instalação, o subsistema leste teve três módulos sombreados. Foi sombreada meia célula do módulo ES1, seis células de uma mesma linha do módulo ES3 e $\frac{1}{4}$ de célula do módulo ES4. Outras configurações de sombreamento de células em uma associação de módulos podem ser verificadas em Rampinelli e Krenzinger (2006). As células foram sombreadas de forma que não houvesse nenhuma radiação incidente sobre elas. Os módulos CS1 e CI1 pertencentes ao subsistema central foram desconectados do arranjo. Para a aquisição de dados foi escolhido um dia ensolarado. Inicialmente, durante 45 minutos, o sistema está conectado à rede e operando nas condições descritas anteriormente. Em seguida, os subsistemas foram desconectados da rede elétrica e os módulos colocados em condição de circuito aberto por um segundo intervalo de 45 minutos. Na seqüência, os painéis localizados na posição leste da instalação, foram colocados

em situação de curto circuito por um terceiro intervalo de 45 minutos. Na continuidade, o sistema foi religado à rede elétrica por 15 minutos. Por fim, três módulos do painel superior leste foram sombreados parcialmente e momentaneamente. Durante as etapas os dados foram constantemente registrados. Objetiva-se verificar o comportamento das tensões dos módulos e painéis que compõem a instalação sob diferentes condições de operação.

A Fig. 2 ilustra o comportamento das tensões dos painéis superiores, leste, centro e oeste, entre 13h e 18h. Inicialmente quando o sistema está conectado à rede elétrica, os painéis, leste e centro, apresentam valores de tensão similares, da ordem de 210V. Porém verifica-se, que a tensão do painel oeste apresenta valores superiores, da ordem de 250V. O painel leste tem módulos sombreados que reduzem sua tensão. O módulo ES1 tem meia célula sombreada, mas o diodo de *bypass*, devido essa condição, elimina um grupo de 24 células. O módulo ES3 tem seis células sombreadas de uma mesma linha. Essa situação polariza diretamente os três diodos de *bypass* do módulo que passa operar com tensão reversa de 2,1V. O módulo ES4 que tem $\frac{1}{4}$ de uma célula sombreada tem sua tensão afetada em apenas 0,5V.

O painel central apresenta um módulo desconectado reduzindo assim sua tensão. Apenas o painel oeste encontra-se em funcionamento pleno com todos módulos em operação e nenhum sombreadamento artificial. Essas condições explicam a diferença nas tensões dos painéis. Quando o sistema é desconectado da rede e os módulos são colocados na condição de circuito aberto, a tensão dos painéis eleva-se, conforme o previsto. Percebe-se que a tensão dos painéis, leste e oeste, apresentam valores similares, da ordem de 300V, com uma diferença entre os dois painéis de cerca de 4V. Isto ocorre porque em circuito aberto, apenas as células que estão sombreadas apresentam tensão nula. O painel central apresenta valores inferiores da ordem de 260V devido o módulo que está desconectado do arranjo.

Na seqüência, os painéis do subsistema leste foram colocados na condição de curto circuito e a tensão caiu para zero, conforme esperado, enquanto que os painéis, do centro e oeste, permaneceram em circuito aberto. Na continuidade, o sistema foi religado à rede e três módulos do painel superior leste, ES5, ES6 e ES7, foram sombreados parcialmente e momentaneamente, o que explica a instabilidade no comportamento da tensão do painel. As tensões dos painéis inferiores, leste, centro e oeste, têm comportamento similar com seus respectivos painéis superiores devido o diodo de bloqueio de cada painel.

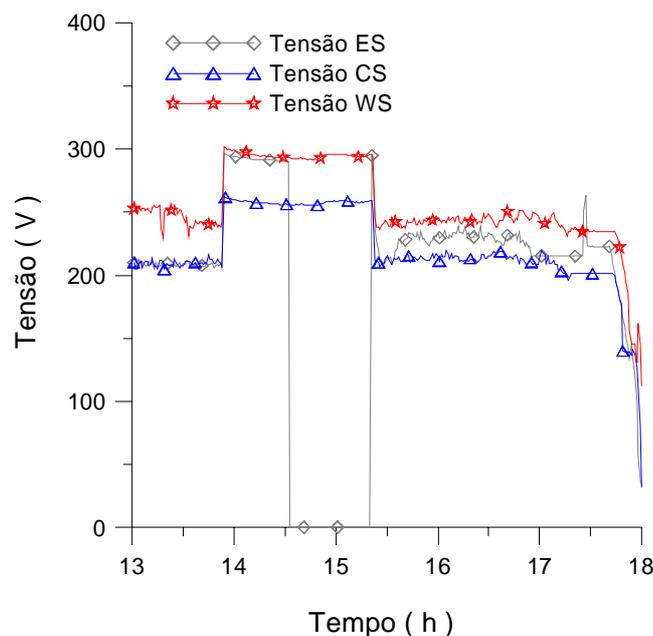


Figura 2 – Comportamento das tensões dos painéis superiores da instalação, entre 13h e 18h.

O comportamento das tensões dos módulos ES1, ES2, ES3 e ES4, entre 13h e 18h, é ilustrado na Fig. 3. Inicialmente quando o sistema está conectado à rede, as tensões dos módulos ES2 e ES4 apresentam valores da ordem de 32V enquanto o módulo ES1, que tem meia célula sombreada, apresenta valores da ordem de 21V. Essa tensão é aproximadamente um terço inferior devido à tensão de 24 células ser nula por pertencerem ao grupo do diodo de *bypass* que está diretamente polarizado. O Módulo ES3, apresenta seis células de uma mesma linha horizontal sombreados. Essa situação polariza diretamente os três diodos de *bypass* e, portanto o módulo apresenta tensões reversas da ordem de 2,1V.

Quando o sistema é desconectado da rede e os módulos colocados em condição de circuito aberto, as tensões se elevam. Verifica-se que a tensão do módulo ES3 é menor devido o sombreamento de seis células. Quando os módulos são colocados em circuito aberto, os mesmos são polarizados reversamente. Na continuidade, com o sistema sendo religado à rede elétrica, mas com a condição de três módulos sombreados parcialmente, o arranjo permanece em circuito aberto, uma vez que o inversor entra em funcionamento quando a tensão em corrente contínua é da ordem de 140V.

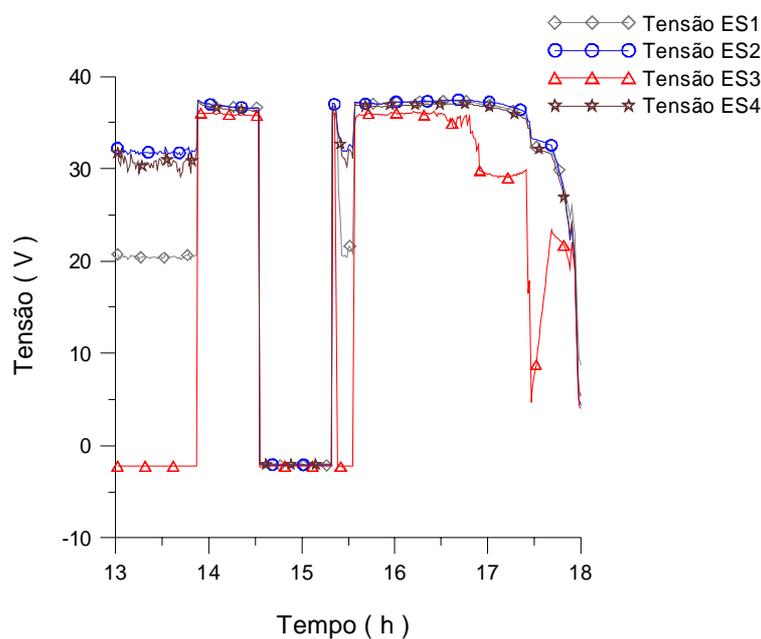


Figura 3 – Comportamento das tensões dos módulos do painel superior-leste, entre 13h e 18h.

A Fig. 4 mostra o comportamento das tensões dos módulos ES5, ES6, ES7 e ES8, entre 13h e 18h. As condições de operação dos módulos são as mesmas que foram descritas anteriormente. Inicialmente os módulos estão conectados a rede elétrica e apresentam valores de operação da ordem de 32V. Em seguida, quando o sistema é colocado em circuito aberto, os módulos apresentam valores da ordem de 37V. Na sequência, os módulos são colocados em condição de curto circuito. Os módulos ES5, ES6 e ES7 apresentam valores da ordem de 3V e não estão operando com tensão reversa, enquanto que o módulo ES8 se polariza reversamente com tensão de 2,1V.

Na continuidade o sistema é religado à rede e os módulos ES5, ES6 e ES7 são sombreados parcialmente. Os módulos ES5 e ES7 apresentam valores de tensões entre 16V e 20V enquanto o módulo ES6 apresenta valores de tensão entre 5V e 10V conforme o número de células sombreadas, sendo que cada célula, do módulo de 72 células, apresenta valores de tensão da ordem de 0,5V sob iluminação e o arranjo encontra-se em circuito aberto, não polarizando os diodos de *bypass*. Os módulos do painel leste inferior não tiveram a condição de sombreamento, tendo comportamento similar aos módulos superiores, que não tiveram condição de sombreamento, nas situações de circuito aberto e curto circuito.

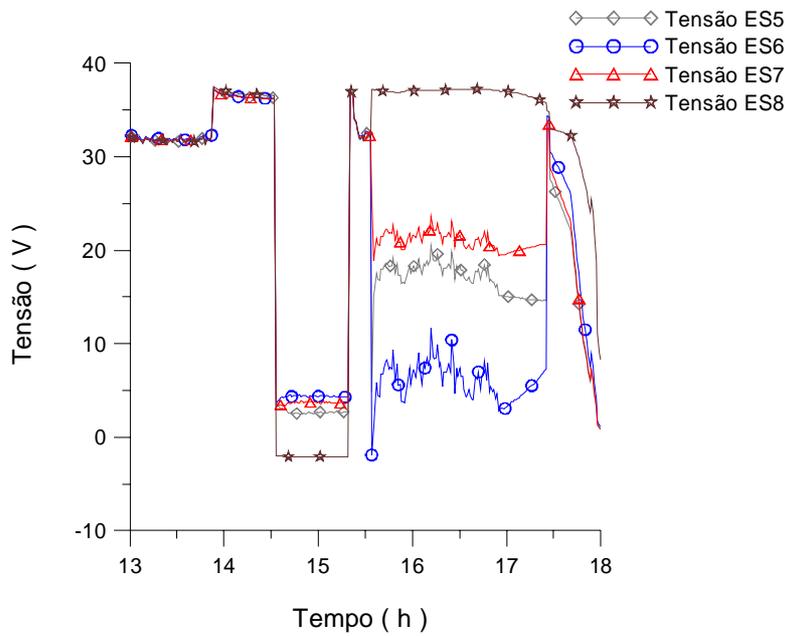


Figura 4 – Comportamento das tensões dos módulos do painel superior leste, entre 13h e 18h.

A Fig. 5 ilustra o comportamento da potência de cada subsistema da instalação e a irradiância, entre 13 e 18h. No instante em que o sistema está conectado à rede, o subsistema oeste apresenta valores superiores de potência em relação aos subsistemas leste e central. A explicação é que o subsistema oeste tem 16 módulos operando normalmente, enquanto o subsistema central tem dois módulos desconectados do arranjo e o subsistema leste tem módulos sombreados. Quando o sistema é colocado em condição de circuito aberto e na seqüência em curto circuito, a potência de cada subsistema cai para zero, devido que na primeira condição a corrente é nula e na segunda situação a tensão é zero. Na continuidade, a partir do instante em que o sistema é religado à rede, a potência de cada subsistema se restabelece como na situação inicial da análise e variando proporcionalmente com a irradiância.

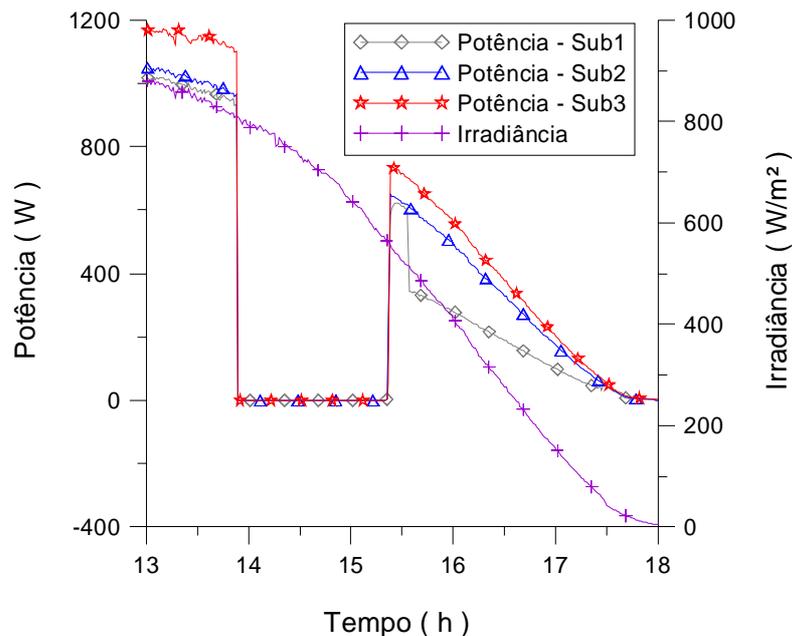


Figura 5 – Comportamento da potência dos subsistemas e irradiância, entre 13 e 18h.

A Fig. 6 ilustra a energia gerada de cada subsistema ao longo do dia ensolarado e nas condições de operação descritas anteriormente. O subsistema oeste teve uma geração de energia elétrica de 6,84 kWh, enquanto o subsistema central apresentou 6,06 kWh com um desempenho 11% inferior em relação ao subsistema oeste. Por fim, o subsistema leste teve uma geração de 5,66 kWh com um desempenho inferior de 17% em relação ao subsistema oeste. Essas diferenças entre os subsistemas se devem ao sombreamento de módulos do subsistema leste e a desconexão de dois módulos do subsistema central.

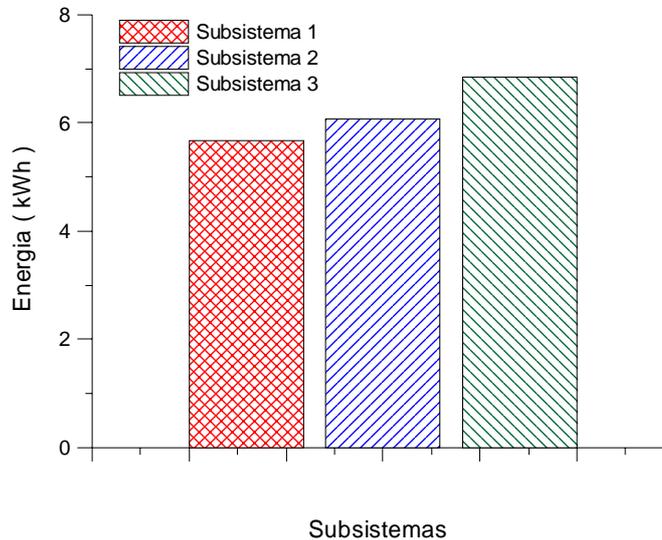


Figura 6 – Energia elétrica de cada subsistema da instalação fotovoltaica em um dia ensolarado.

5. ANÁLISE COMPUTACIONAL

Para a análise computacional foi utilizado um programa de simulação desenvolvido no laboratório de energia solar da UFRGS por Krenzinger e Adams, 2000, denominado CREARRAY, que tem por objetivo analisar o comportamento de uma associação de módulos fotovoltaicos, considerando efeitos de temperatura, irradiância e possíveis diferenças entre os módulos que compõem a instalação. O programa fornece a curva característica da associação a partir das curvas características de cada módulo, as quais são obtidas através de um modelo matemático que trabalha com parâmetros obtidos nos catálogos fornecidos pelos fabricantes dos módulos. Para estudar o efeito de células individualmente diferentes, ou sombreadas, é possível informar os dados de cada célula para formar um módulo resultante que pode então ser inserido ao painel.

O programa está em desenvolvimento. A versão atual permite a visualização da curva característica da célula, módulo, painel ou arranjo sob condições de irradiância e temperatura em um dado instante. No desenvolvimento do programa o mesmo será capaz de simular o comportamento das tensões ao longo do tempo.

A partir do programa foi criado um arranjo do subsistema leste a partir dos parâmetros de cada módulo que compõe o subsistema, obtidos por Krenzinger e Prieb (2005). Para simular o efeito do sombreamento de uma célula, foram criados três módulos de 24 células e um diodo de *bypass*. Os três módulos foram associados em série formando um módulo resultante e que experimentalmente foi o que teve uma célula sombreada. Quando uma célula está sombreada, o diodo de *bypass* elimina 24 células, conforme anteriormente descrito. Os dados de entrada são os valores experimentais de irradiância e temperatura. Para um dos módulos o valor da irradiância foi zero, simulando o sistema experimental na condição de sombreamento.

A Fig. 7 mostra as curvas características do subsistema leste para uma condição de 900W/m^2 e temperatura de 40°C na situação de sombreamento de uma célula de um módulo e sem sombreamento. Para a configuração de sombreamento, a potência máxima é de 1240W enquanto para a

condição de não sombreamento a potência é de 1270W. Uma diferença de performance da ordem de 2,4%.

Os valores experimentais de corrente, tensão e potência do subsistema para a configuração sem sombreamento foram de, respectivamente, 4,48A, 272V e 1218W. Portanto, o sistema não está operando em máxima potência. Fixando o valor de corrente para 4,48A na curva simulada encontra-se um valor de tensão de operação de 270V e potência de 1183W. A diferença entre a potência medida e simulada é de 3%. Fixando o valor de tensão em 272V encontra-se uma corrente de operação de 4,28A e potência de 1164W com uma diferença de 4,7%.

Os valores experimentais de corrente, tensão e potência do subsistema para a configuração com sombreamento foram de, respectivamente, 4,93 A, 245V e 1207W. Fixando o valor de corrente em 4,93 A, encontra-se uma tensão de 249V e potência de 1228W. Uma diferença de 1,6% entre a potência medida e simulada. Fixando o valor de tensão em 245V, encontra-se uma corrente de 5,05A, uma de potência de 1237W e uma diferença, entre as potências de 2,4%.

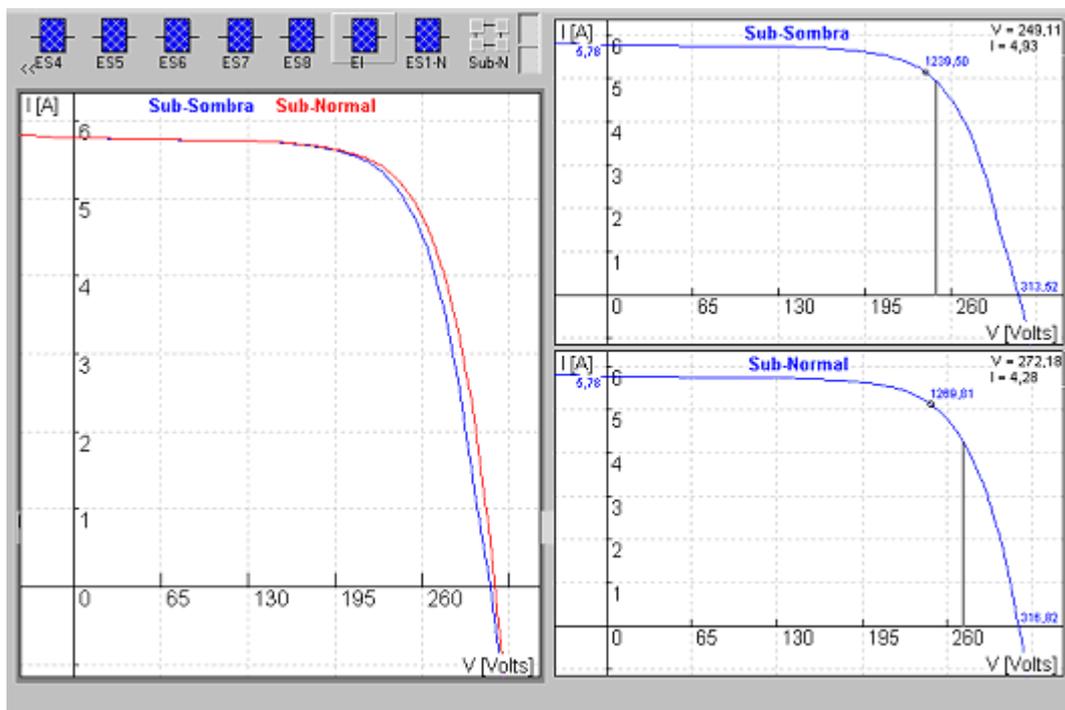


Figura 7 – Configuração do subsistema leste com irradiância de $900\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura de 40°C na condição de sombreamento e não sombreamento.

O procedimento foi repetido para uma condição de $800\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura de 35°C na situação de sombreamento de uma célula de um módulo e sem sombreamento. Para a configuração de sombreamento, a potência máxima é de 1117W enquanto para a condição de não sombreamento a potência é de 1145W. Uma diferença de performance da ordem de 2,5%.

Os valores experimentais de corrente, tensão e potência do subsistema para a configuração sem sombreamento foram de, respectivamente, 4,35A, 261V e 1135W. Fixando o valor de corrente para 4,35A na curva simulada encontra-se um valor de tensão de operação de 260V e potência de 1131W. Fixando o valor de tensão em 261V encontra-se uma corrente de operação de 4,33A e potência de 1130W. A diferença entre as potências medida e simulada é de 0,4% e 0,5%.

Os valores experimentais de corrente, tensão e potência do subsistema para a configuração com sombreamento foram de, respectivamente, 4,48 A, 248V e 1102W. Fixando o valor de corrente para 4,45A na curva simulada encontra-se um valor de tensão de 250V e potência de 1112W. Fixando a tensão em 248V, encontra-se uma corrente de 4,49A e potência de 1113W. Têm-se uma diferença de 0,9% e 1% entre a potência medida e simulada.

As diferenças entre experimentação e simulação devem-se as incertezas das medidas de irradiância nas células de referência, de temperatura dos módulos devido à incerteza do sensor e o fato de apenas um módulo ter sua temperatura medida, e da corrente elétrica devido à incerteza do *shunt*.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento de parâmetros elétricos de uma instalação fotovoltaica conectada à rede elétrica em condições variadas de operação como sistema em circuito aberto, curto circuito e sombreamento. Foram observados os comportamentos das tensões individuais dos módulos de um subsistema, das correntes elétricas de seis painéis que compõem a instalação, e as potências de cada subsistema ao longo de um dia ensolarado e nas variadas condições de operação. O estudo também contemplou o impacto dessas condições na geração de energia elétrica do subsistema. Verificou-se que os módulos sombreados artificialmente apresentam valores bem inferiores de tensão ao longo dos dias conforme o número de células na sombra e principalmente como estão conectados os diodos de *bypass* reduzindo a potência do sistema. A corrente do painel sombreado também é afetada, apresentando perdas energéticas. Os diodos de *bypass* e de bloqueio protegem o sistema de danos causados pelo superaquecimento de células sombreadas e reduzem, mas não impedem a perda de energia no sistema. Módulos que tiveram uma ou mais células sombreadas, porém pertencentes ao mesmo diodo de *bypass* apresentam perdas de energia da ordem de 35% enquanto que quando o sombreamento ocorre em células de diferentes diodos de *bypass* as perdas são da ordem de 70%. Nos subsistemas leste e central, que tiveram respectivamente, três módulos sombreados e dois módulos desconectados do arranjo, a performance de energia é, da ordem de 17% e 11%, respectivamente, inferior em relação ao subsistema oeste que não teve módulos sombreados ou desconectados do arranjo. O programa de simulação, além de permitir uma previsão do comportamento do sistema em condições normais de operação, também possibilita a descrição do mesmo em condições especiais, como o sombreamento de células. Os valores obtidos experimentalmente mostraram concordância com dados obtidos através da simulação do sistema. As diferenças devem-se as incertezas de medidas de irradiância, temperatura e corrente.

Agradecimentos

O trabalho contou com o apoio da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), ELETROBRÁS, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

- Bhattacharya, G., et al, 1991. Removal of the Hot Spot Problem in Photovoltaic Modules and Arrays. *Sol Cells*, 31, 1-12.
- Chamberlin, C. E., et al, 1995. Effects of mismatch losses in photovoltaic arrays. *Solar Energy*, 54, 165-171.
- Dias, J. B., 2006, Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede: Estudo Experimental para Otimização do Fator de Dimensionamento. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- González, C. C., 1986. Photovoltaic Array Loss Mechanisms. *Sol Cells*, 18, 373-382.
- Hecktheuer, L. A., 2001, Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Hecktheuer, L.A., Krenzinger, A., Prieb, C.W.M., 2002. Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis, *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 24: 26 – 31.
- Krenzinger, A., Dias, J. B., Prieb, C. W. M., 2004. Sistema Fotovoltaico Conectado à rede o Sul do Brasil, XII Congresso Ibérico e VII Congresso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Espanha. 1019-1024.

- Krenzinger, A., Prieb, C. W. M., 2005. Clasificación y Selección de Módulos Fotovoltaicos para una Central Conectada a la Red. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, pp 04.19-04.24.
- Krenzinger, A., Adams, T. R., 2000. CREAMRAY – Programa de Análise de Sistemas Fotovoltaicos, Laboratório de Energia Solar – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Rampinelli, G. A., Krenzinger, A., 2006. Efeito do Sombreamento em Células de uma Associação de Módulos Fotovoltaicos Conectados à Rede. Associação Argentina de Energias Renováveis e Ambiente, ASADES.
- Schmid, R., et al, 1998. New Protection Principle Against Hot Spots in Crystalline Silicon Cell Modules for Implementing in Module-integrated Inverters. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Áustria, 1906-1911.
- Wiles, J. C., King, D. L., 1997. Blocking Diodes and Fuses in Low Voltage PV Systems. Proc 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference.

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF VOLTAGE, CURRENT AND POWER, IN AN ASSOCIATION OF MODULES OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC PLANT.

***Abstract.** This work presents an analysis of the distribution of voltages in one of the subsystems of a 4800 W_p grid-connected photovoltaic plant, which uses 100 W_p modules with mono-crystalline silicon cells and inverters rated to 1000 W_p output. This plant was divided into three subsystems whose installed power is different each other. The subsystem 1 had three modules with shadowed cells, the subsystem 2 had two modules detached from the array, while the subsystem 3 was not modified. The study of the voltage, current and power of the subsystems, allows the analysis of the installation in different conditions. Situations where the installation is shadowed, in open circuit or short circuit represent losses of energy. Finally, it were performed by using a simulation software, comparisons between experimental and simulated values, and these comparisons show a very good agreement.*

Keywords: Solar energy, Photovoltaic System, Conversion Energy.