

INÍCIO DA OPERAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA ALTO DO RODRIGUES (UFV-AR) – RESULTADOS PRELIMINARES

Cleber Onofre Inácio – cleberoi@petrobras.com.br
Hugo Tavares Vieira Gouveia – hugo.gouveia@petrobras.com.br
Luiz Fernando Almeida Fontenele – luizfontenele@petrobras.com.br
Paulo Henrique Fernandes Ferreira – phff@petrobras.com.br
Rodrigo Guido Araújo – r.guido@petrobras.com.br
Petróleo Brasileiro S.A., Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES)

Resumo. *O presente trabalho apresenta dados preliminares e informações já disponíveis por ocasião do início da operação da Usina Fotovoltaica Alto do Rodrigues (UFV-AR), uma instalação piloto que foi construída dentro do escopo de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras junto à ANEEL. Na sua concepção a usina foi dividida em quatro subsistemas, cada um com características específicas de potência instalada, tecnologia dos módulos e estruturas de montagem. Neste trabalho, são apresentadas algumas análises e comparações feitas sobre os primeiros dados obtidos durante seus primeiros meses de operação com os dados de irradiação solar e correspondente energia elétrica produzida, especificamente para alguns dias selecionados. O objetivo é apresentar um primeiro panorama do comportamento operacional da planta, discutindo, ainda em caráter preliminar, alguns primeiros resultados quantitativos de parâmetros e índices de desempenho relativos à geração de energia elétrica.*

Palavras-chave: *Usina Fotovoltaica, Implantação e Operação, Desempenho Operacional*

1. INTRODUÇÃO

Buscando criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura técnica para a inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética nacional, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou o edital de Chamada de Projeto Estratégico de P&D nº 013/2011 “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”, com o objetivo de alavancar a cadeia produtiva dessa fonte no país, em termos regulatórios, mercadológicos, tecnológicos e acadêmicos.

Nesse contexto, dentre os vários requisitos definidos no referido edital, estava a instalação de uma usina solar fotovoltaica. Assim, alinhado à estratégia corporativa então vigente de ampliar seus negócios envolvendo a geração de energia elétrica, a Petrobras formalizou em 2012 junto à ANEEL o início do projeto “Estudo da Geração Fotovoltaica Centralizada e seu Impacto no Sistema Elétrico”. O projeto consiste, entre outras atividades, na construção de uma usina de potência nominal de 1,1 MWp localizada no município de Alto do Rodrigues/RN e conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Motivaram a realização do empreendimento a geração de conhecimento e de informação técnica, a capacitação do corpo técnico envolvido e a experiência das boas práticas de engenharia para esse tipo de empreendimento desde as etapas iniciais de concepção e elaboração de projeto até as etapas finais de sua construção e operação.

Conceitualmente, a usina foi dividida em quatro subsistemas. O primeiro e maior deles, com potência de 1,0 MWp, é constituído por módulos fotovoltaicos de silício policristalino, montados em rastreadores de um eixo horizontal norte-sul. Já o segundo compartilha da mesma tecnologia anterior, tem potência de 50 kWp e é instalado em estruturas fixas. Os outros dois também são montados em estruturas fixas, cada um possuindo potência de 25 kWp, sendo um da tecnologia de silício amorfo e o outro de disseleneto de cobre, índio e gálio.

A opção de utilização simultânea de diferentes tecnologias tem o objetivo de gerar informações para o desenvolvimento de estudos, avaliações e comparações das características técnicas, tais como desempenho, operação e manutenção. Isso é viabilizado também pela instalação de diversos instrumentos de medição de grandezas meteorológicas, tais como: irradiação, temperatura e velocidade do vento; além de instrumentação para a medição de grandezas elétricas, como tensão e corrente - tanto em corrente contínua como em alternada. Ainda, no que diz respeito à instrumentação, são monitoradas a temperatura de alguns módulos e a inclinação dos rastreadores. É importante chamar a atenção ao fato de que, devido aos particulares objetivos e interesses desse empreendimento (mais voltados à pesquisa científica e geração de informação técnica), um esforço adicional foi dispendido na concepção e na implementação do sistema supervisorio e de coleta de dados. Neste caso apresentam-se especificações mais restritivas, maior variedade e registro da informação gerada do que é usualmente encontrado em outros empreendimentos com finalidade estritamente comercial.

Os subsistemas da usina possuem características diferenciadas entre si (diferentes eficiências, coeficientes de temperatura, opções de instalação física, etc), apresentando um conjunto de vantagens e desvantagens que requer avaliação considerando o contexto nacional. Assim, este trabalho visa contribuir com essa avaliação através da consolidação de informações preliminares acerca da operação da UFRV-AR produzidas no âmbito do projeto de P&D. De

posse dos dados de produção e consumo, incluindo as perdas, foi possível obter quantitativos dos fluxos de energia em cada subsistema.

É necessário chamar atenção ao fato de que, concomitantemente à construção, montagem e operação da usina, a Petrobras deu início à elaboração de um conjunto abrangente de estudos e atividades de pesquisa, desenvolvidos com a colaboração de alguns parceiros, tais como a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), o *Electric Power Research Institute* (EPRI) e o Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER). Esse último atuou no projeto com a consultoria do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As tarefas desempenhadas pela Petrobras e seus parceiros, juntamente com o conjunto das informações obtidas pelo sistema supervisorio da usina, constituem um núcleo fundamental para o sucesso do projeto e alcance dos objetivos que foram pré-estabelecidos.

2. USINA FOTOVOLTAICA ALTO DO RODRIGUES (UFV-AR)

A UFV-AR é a primeira planta de geração fotovoltaica centralizada da Petrobras e está localizada no terreno da Usina Termelétrica Jesus Soares Pereira (UTE-JSP), no município de Alto do Rodrigues/RN, tendo as coordenadas geográficas 5,3816° Sul e 36,8204° Oeste, distante aproximadamente 216 km da cidade de Natal/RN.

2.1 Descrição das características gerais do empreendimento

A área escolhida para a instalação da UFV-AR encontra-se demarcada pelo polígono vermelho da Fig. 1 (a), correspondendo a uma área de cerca de 30.000 m². A maquete eletrônica da usina é mostrada na Fig. 1 (b).



Figura 1 – UFV-AR. (a) Área escolhida para a obra. (b) Maquete Eletrônica do projeto. Fonte: elaboração própria, adaptado de (Google, 2014).

A UFV-AR apresenta potência nominal instalada (total) de 1,1 MWp (1.137,95 kWp de módulos fotovoltaicos e 1.138 kW de inversores, com $FDI^1 = 1,00$) e é dividida em quatro subsistemas como segue:

- a) **Subsistema 1:** Módulos de silício policristalino (p-Si) montados em rastreadores de um eixo horizontal norte-sul com potência instalada de 1,0 MWp (1.034 kWp) ligados a dois inversores de 519 kW ($FDI = 1,00$);
- b) **Subsistema 2:** Módulos de silício policristalino (p-Si) montados em estruturas fixas de inclinação 10°N com potência instalada de 0,05 MWp (52,2 kWp) ligados a dois inversores de 25 kW ($FDI = 0,96$);
- c) **Subsistema 3:** Módulos de silício amorfo (a-Si) montados em estruturas fixas de inclinação 10°N com potência instalada de 0,025 MWp (26,27 kWp) ligados a um inversor de 25 kW ($FDI = 0,95$);
- d) **Subsistema 4:** Módulos de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS) montados em estruturas fixas de inclinação 10°N com potência instalada de 0,025 MWp (25,48 kWp) ligados a um inversor de 25 kW ($FDI = 0,98$).

Além dos sistemas descritos citados acima, também foi feita instalação de uma estação solarimétrica de medição, visando gerar informação de suporte aos estudos energéticos associados ao empreendimento. Atualmente, o empreendimento encontra-se praticamente finalizado, e os subsistemas geradores podem ser conferidos na Fig. 2.

¹ Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI). Definido pela razão entre a potência nominal do inversor e a potência instalada de módulos fotovoltaicos.

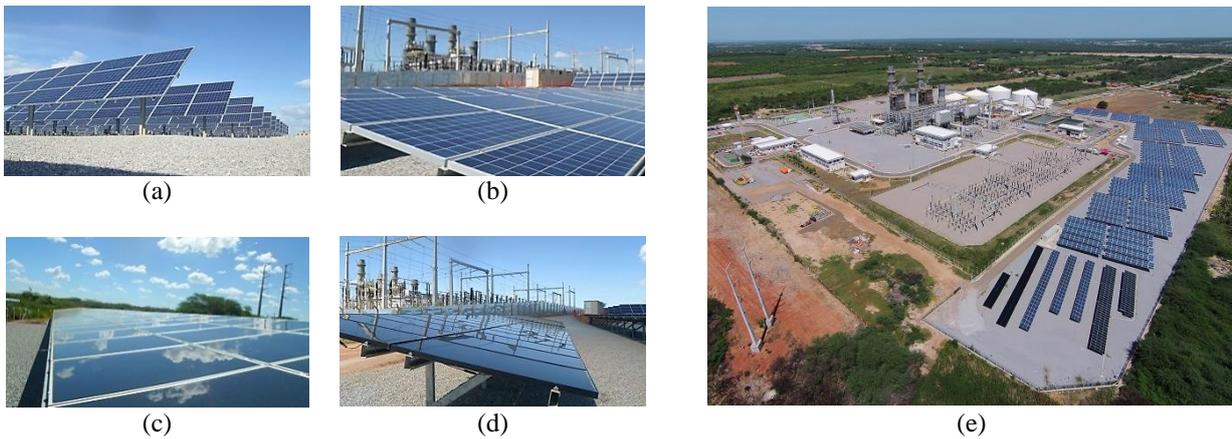


Figura 2 – Imagens das instalações da UFV-AR: (a): subsistema 1. (b) subsistema 2. (c): subsistema 3. (d) subsistema 4. (e): vista aérea da UFV-AR. Fonte: elaboração própria.

3. PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Em geral, as instalações fotovoltaicas utilizam um sistema de aquisição de dados para registrar informações de irradiação solar incidente e de produção de energia elétrica, com o objetivo de verificar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Com isso, é possível consolidar dados, sejam eles anuais, mensais, diários ou até mesmo horários, para realizar comparações a fim de otimizar a instalação da tecnologia (Häberlin, 2012).

A produtividade do sistema fotovoltaico, Y_F , é dada pela Eq. (1), que indica quanto de energia cada unidade de potência do sistema fotovoltaico produz, ou ainda, por quanto tempo o sistema fotovoltaico tem que operar na potência nominal para que seja produzida a mesma quantidade de energia. Nesse cálculo, englobam-se todas as perdas envolvidas, como perdas por captação e perdas no sistema. Na Eq. (1), E_{use} corresponde à energia entregue ao sistema elétrico, e P_{G_0} à potência nominal do sistema fotovoltaico (International Electrotechnical Commission (IEC), 1998).

$$Y_F = \frac{E_{use}}{P_{G_0}} \quad (1)$$

Já a produtividade do painel fotovoltaico, Y_A , é dada pela Eq. (2), que indica quanto de energia cada unidade de potência do painel fotovoltaico produz. É importante observar que esse cálculo não leva em consideração as perdas no restante do sistema fotovoltaico (*balance of system*), como perdas na conversão c.c./c.a., nos cabos e no sistema de armazenamento (caso haja). Na Eq. (2), E_A corresponde à energia produzida pelo painel fotovoltaico.

$$Y_A = \frac{E_A}{P_{G_0}} \quad (2)$$

Cabe salientar que, uma vez que as produtividades são dadas por unidade de potência, isso permite que sistemas de diferentes tamanhos sejam comparados entre si.

Analogamente, a produtividade diária de referência, Y_R , é dada pela Eq. (3), a qual corresponde à quantidade de horas que o Sol teria que irradiar energia em um dia, a uma taxa constante de $G_0 = 1.000 \text{ W/m}^2$, para que a energia incidente no plano dos módulos seja igual à verificada (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2013). Esse conceito é também conhecido como horas de Sol pleno. Na Eq. (3), H_G corresponde à energia incidente no plano dos módulos fotovoltaicos.

$$Y_R = \frac{H_G}{G_0} \quad (3)$$

Para uma melhor compreensão, é mostrado o diagrama de perdas na Fig. 3, por intermédio da qual verifica-se que a produtividade do sistema fotovoltaico, Y_F , é obtida da do painel fotovoltaico, Y_A , descontando-se as perdas no restante do sistema fotovoltaico (*balance of system*), L_S . Seguindo o mesmo raciocínio, a produtividade do painel fotovoltaico, Y_A , é obtida da de referência corrigida pela temperatura, Y_T , com o desconto das perdas por captação devido a fatores diversos L_{CM} . Por sua vez, a produtividade de referência corrigida pela temperatura, Y_T , é obtida da de referência, Y_R , descontando-se as perdas por captação devido a temperatura, L_{CT} . As perdas por fatores diversos, L_{CM} , englobam perdas causadas por irradiação não uniforme ou com baixos níveis, sombreamento parcial, sujeira, poluição, erros de seguimento do ponto de

máxima potência dos inversores, falhas no inversor, erros de medição de irradiância, além das perdas nos cabos e nos diodos.

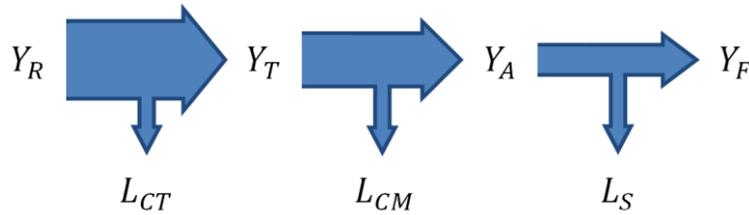


Figura 3 – Diagrama de perdas. Fonte: adaptado de (Häberlin, 2012).

O fator de capacidade (FC_{CC} para corrente contínua ou FC_{CA} para corrente alternada) é definido como a razão entre a energia produzida pelo sistema fotovoltaico, E_{Use} , e o que seria produzido se ele operasse continuamente durante um intervalo de tempo, t , em sua capacidade nominal em corrente contínua, P_{CC} , ou em corrente alternada, P_{CA} . Matematicamente, podem ser expressos pelas Eq. (4) e (5).

$$FC_{CC} = \frac{E_{Use}}{P_{CC} \cdot t} \quad (4)$$

$$FC_{CA} = \frac{E_{Use}}{P_{CA} \cdot t} \quad (5)$$

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Comparação entre as tecnologias

O sistema de aquisição de dados da UFV-AR ainda se encontra em fase final de implantação, mas já disponibiliza um conjunto de informações que permite avaliar o desempenho das diferentes tecnologias de conversão fotovoltaica e opções de montagem.

Todas as variáveis são gravadas em bancos de dados com registros a cada segundo. Para essa comparação foram selecionadas a irradiância global no plano horizontal (obtida da estação meteorológica) e as correntes e tensões nos arranjos fotovoltaicos (obtidas nas caixas de conexão).

Para cada um dos quatro subsistemas foi selecionada uma caixa de conexão com os arranjos que seguem:

- Subsistema 1: Arranjo de 18 *strings* de 18 módulos em série totalizando 93.960 Wp;
- Subsistema 2: Arranjo de 5 *strings* de 18 módulos em série totalizando 26.100 Wp;
- Subsistema 3: Arranjo de 19 *strings* de 5 módulos em série totalizando 13.490 Wp;
- Subsistema 4: Arranjo de 14 *strings* de 14 módulos em série totalizando 25.480 Wp.

Em seguida foi calculada a energia gerada em cada arranjo para um dia inteiro (a partir dos registros de medição dos 86.400 segundos correspondentes). Essa energia foi dividida pela potência nominal de cada arranjo buscando uma base comum de comparação. O número assim obtido equivale à produtividade do painel fotovoltaico, Y_A , para cada tecnologia/estrutura de montagem na sua potência nominal ao longo daquele dia considerado. Os resultados obtidos estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Comparação entre as diferentes tecnologias para um dia de operação. Fonte: elaboração própria.

SUBSISTEMA	POTÊNCIA (kWp)	ENERGIA (kWh)		Y_A (kWh/kWp)	
		12/08/2015	23/08/2015	12/08/2015	23/08/2015
1	93,96	365,80	645,90	3,89	6,87
2	26,10	96,83	156,11	3,71	5,98
3	13,49	43,96	75,26	3,26	5,58
4	25,48	77,10	127,86	3,03	5,02

Esses são resultados preliminares válidos para os dias estudados. A comparação entre as tecnologias será refeita quando a usina atingir 1 ano completo de operação e o tratamento estatístico adequado for possível.

Nas Fig. 4 (a), (b), (c) e (d) são mostradas as potências c.c. normalizadas para cada um dos arranjos de *strings* sumarizados na Tab. 1, para os dias 12/08/2015 e 23/08/2015. Comparando a Fig. 4 (a) com as Fig. 4 (b), (c) e (d), é possível observar os ganhos obtidos pelo emprego de rastreadores, particularmente para o dia 23/08/2015. Nesse dia, o subsistema 1 produziu 15 % a mais de energia normalizada do que o subsistema 2, que faz uso de módulos fotovoltaicos idênticos. Tal ganho significativo não se verifica no dia 12/08/2015, em que a energia gerada foi apenas 5 % superior. Esse resultado é explicado pelo alto nível de radiação difusa (e consequentemente baixos níveis de radiação direta) verificados nesse dia em decorrência da presença de nuvens ao longo de todo o dia. Assim, como o rastreador propicia melhor aproveitamento da radiação direta, os ganhos em dias com grande presença de nuvens não são tão pronunciados.

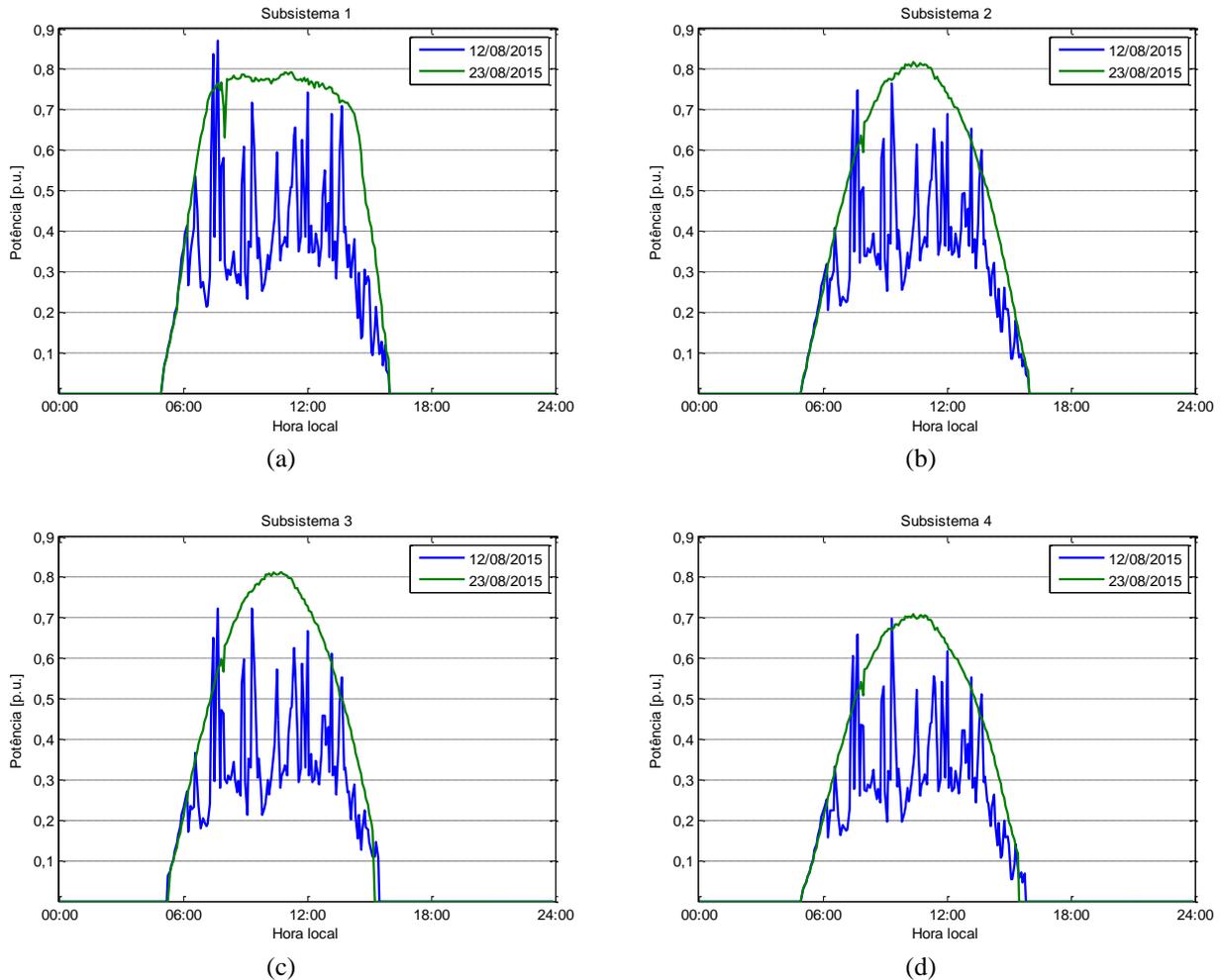


Figura 4 – Potência c.c. normalizada para os dias 12/08/2015 e 23/08/2015 referente ao (a) subsistema 1, (b) subsistema 2, (c) subsistema 3 e (d) subsistema 4. Fonte: elaboração própria.

4.2 Operação da UFV-AR

Na Fig. 5, são apresentadas as irradiâncias global, difusa e direta para os dias 07/09/2015, 05/10/2015, 08/10/2015 e 10/10/2015, respectivamente, bem como os valores máximos e integralizados ao longo do dia. Esses dias foram escolhidos por apresentarem padrões distintos entre si. O primeiro deles é um dia considerado claro, enquanto no último observa-se o efeito de sombreamento causado por passagens de nuvens ao longo de todo o dia. Nos dias intermediários, esse efeito é mais pronunciado somente em parte do dia, ora na primeira metade, ora na segunda.

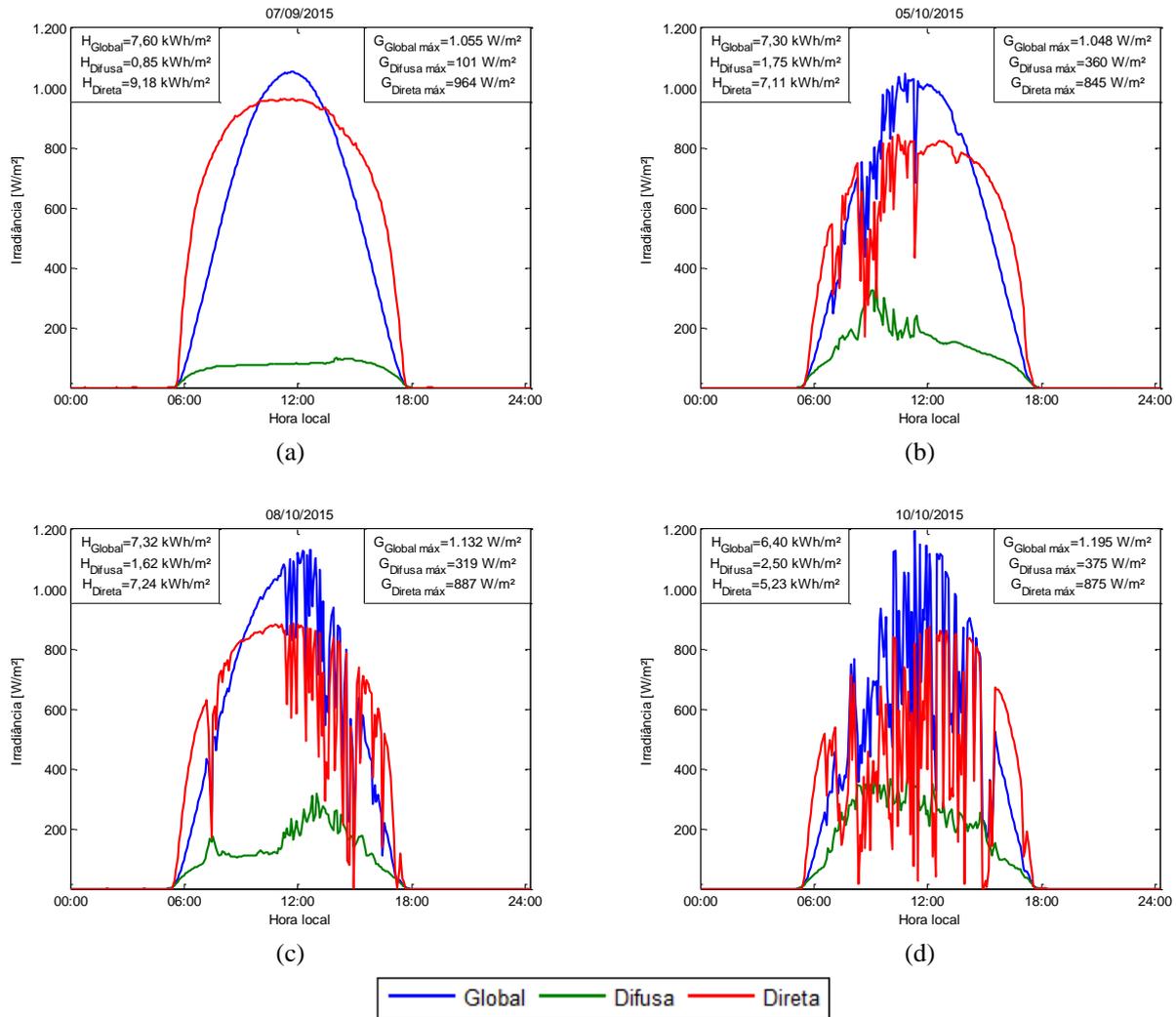
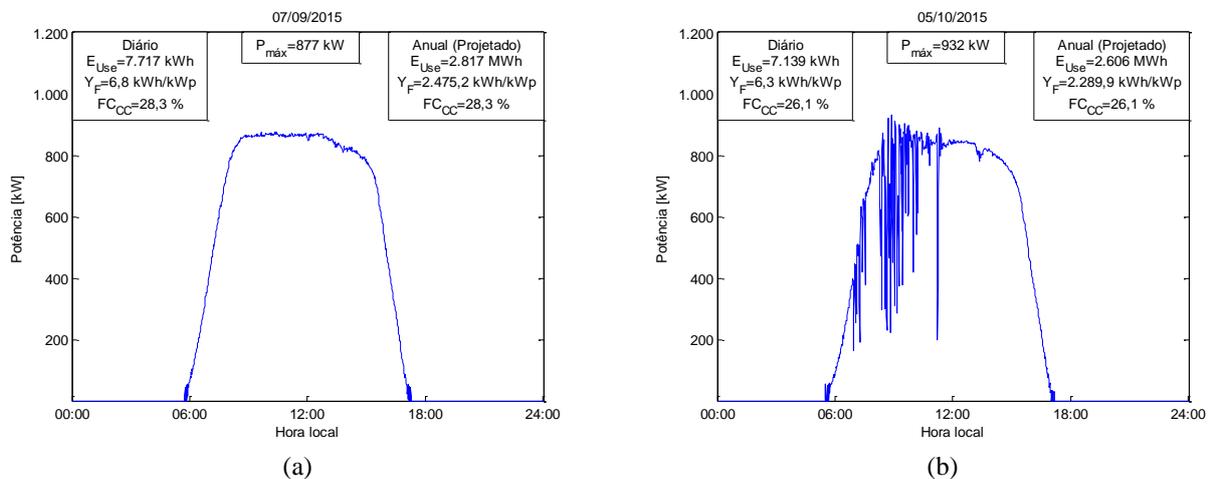


Figura 5 – Irradiâncias global, difusa e direta em (a) 07/09/2015, (b) 05/10/2015, (c) 08/10/2015 e (d) 10/10/2015. Fonte: elaboração própria.

Na Fig. 6, são apresentadas as correspondentes potências de saída da UFV-AR para os mesmos dias em questão. Para cada um deles, é possível verificar a energia injetada na rede elétrica, E_{Use} , a produtividade do sistema fotovoltaico, Y_F , e o fator de capacidade, FC_{CC} , além da potência máxima instantânea, $P_{máx}$. Ainda, observam-se as projeções desses valores para o período de um ano, caso todos os dias fossem iguais ao respectivo dia.



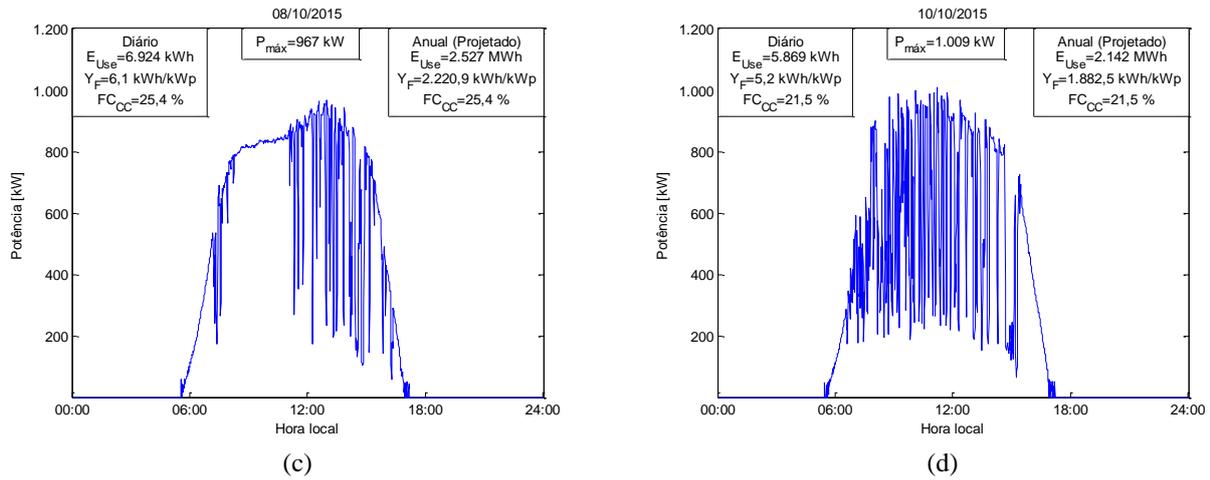


Figura 6 – Potência de saída da UFV-AR em (a) 07/09/2015, (b) 05/10/2015, (c) 08/10/2015 e (d) 10/10/2015. Fonte: elaboração própria.

De acordo com as Fig. 5 e 6, constata-se que nos períodos em que há grande intermitência em função da passagem de nuvens, os valores de irradiância difusa são maiores que os de um dia claro, causando um aumento instantâneo da irradiância global (efeito lente) e uma forte variabilidade na potência de saída da usina. Entretanto, apesar desse aumento em alguns instantes de tempo, verifica-se que a irradiação global e, conseqüentemente a energia produzida, apresentam valores menores quando integralizados ao longo de um dia nublado. Por exemplo, comparando os dias 07/09/2015 e 10/10/2015 por meio das Fig. 5 (a), 5 (d), 6 (a) e 6 (d) observa-se que a irradiância global máxima e a potência máxima são maiores para o dia nublado, ao passo que os correspondentes valores integralizados de irradiação global e energia são menores.

Na Fig. 7 (a), é mostrada a irradiância global para cada dia do mês de agosto de 2015, discretizada em intervalos de 15 minutos. Seguindo o mesmo raciocínio, a potência de saída da usina é apresentada na Fig. 7 (b). Verifica-se a relação direta da potência de saída com a irradiância global, sendo possível observar o acréscimo na energia produzida proporcionado pelo uso de rastreamento na maior parte da planta. Isso pode ser constatado através da dilatação da curva da potência, que é mais facilmente observada em dias claros, como o dia 23/08/2015.

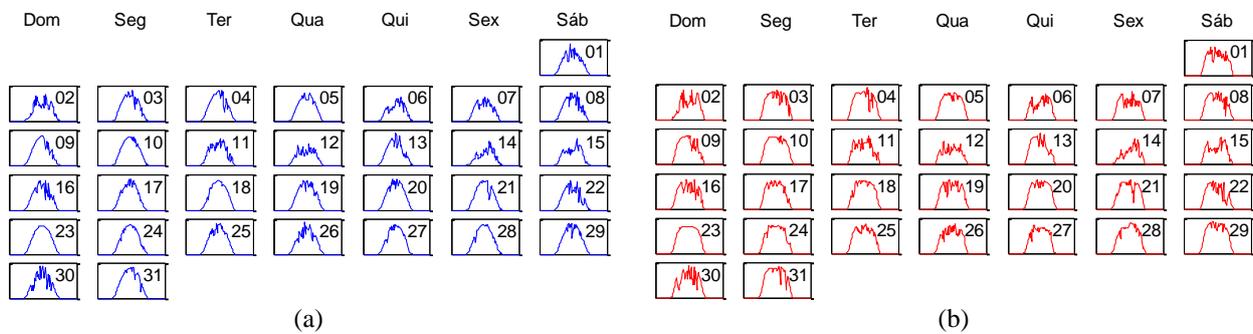


Figura 7 – Dados de (a) irradiância global e (b) potência de saída em agosto de 2015. Fonte: elaboração própria.

Na Fig. 8, são apresentados alguns índices de desempenho da UFV-AR, como energia mensal injetada na rede, produtividade mensal, produtividade diária média e fator de capacidade para os meses de junho a novembro de 2015. É importante observar que os meses de junho e novembro, marcados com um asterisco, são as projeções para os referidos meses, uma vez que não se dispunha de todos os valores diários. Cabe salientar que, para efeitos de comparação entre os meses selecionados, realizou-se o cálculo da produtividade diária média para eliminar a diferença entre as quantidades de dias nos meses. Além disso, os valores apresentados levam em consideração as eventuais indisponibilidades ocorridas na operação.

Pela Fig. 8, verifica-se que, nos meses de setembro a novembro de 2015, a produtividade diária média da UFV-AR é de aproximadamente 5,5 kWh/kWp, correspondendo a um fator de capacidade da ordem de 23 %. É importante ressaltar que o fator de capacidade aqui apresentado corresponde praticamente aos respectivos valores c.c. e c.a., uma vez que o fator de dimensionamento global da UFV-AR é considerado unitário.

Quando a mesma análise é feita para os meses de junho a novembro de 2015, observa-se que o fator de capacidade médio é aproximadamente 20 %, concordando com os índices de outras usinas da mesma região, participantes do Leilão de Energia de Reserva (LER) de 2014 (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2014).

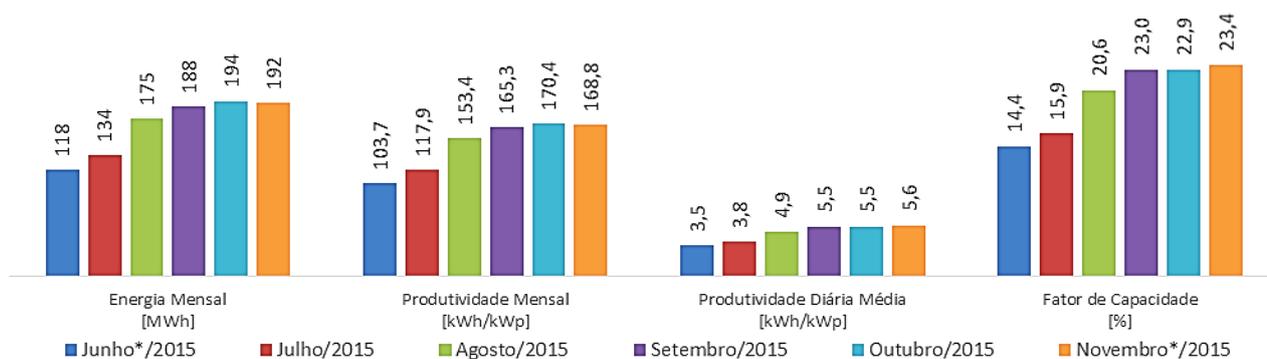


Figura 8 – Resultados operacionais preliminares da UFV-AR. Fonte: elaboração própria.

5. CONCLUSÃO

Os resultados experimentais aqui apresentados são decorrentes dos primeiros meses de operação da UFV-AR, uma planta piloto composta por subsistemas com características distintas entre si, tanto em potência instalada, quanto em tecnologias de módulos fotovoltaicos e em estruturas de montagem.

Os principais parâmetros de desempenho obtidos foram a produtividade e o fator de capacidade. Para um dia com poucas nuvens, o subsistema com rastreamento apresentou desempenho 15 % acima do verificado para o subsistema sem rastreamento e mesma tecnologia de módulos. Outro resultado relevante observado nos dias em análise foi o desempenho inferior da tecnologia CIGS em relação às demais empregadas na planta. Nos dias com poucas e muitas nuvens, a produção de energia normalizada foi inferior em 16,1 % e 18,4 %, respectivamente. Esse resultado poderá ser comprovado futuramente após obtenção do registro histórico de no mínimo 12 meses de operação.

Este trabalho apresentou os resultados de um primeiro exercício de análise dos dados de operação da usina. À medida em que todos os sensores da planta estejam instalados e operacionais por um período razoável de tempo será possível realizar um diagnóstico mais abrangente do desempenho das diversas tecnologias empregadas na planta. As informações geradas serão de grande valia no projeto de usinas fotovoltaicas otimizadas para as condições climáticas brasileiras.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com recursos financeiros da Petrobras vinculados ao programa de P&D regulado pela ANEEL, no âmbito do projeto PD-0553-0017/2011 para atendimento à chamada de projeto estratégico nº 013/2011.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2013. ABNT NBR 10899: Energia solar fotovoltaica – Terminologia, Rio de Janeiro: ABNT.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2014. Participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos: visão geral, Rio de Janeiro: EPE.
- Google, 2015. Google Earth. [Online] Disponível em < <http://www.google.com/earth/> >.
- Häberlin, H., 2012. Photovoltaics: system design and practice, Chichester: John Wiley & Sons.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 1998. IEC 61724: Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis, Geneva: IEC.

INITIAL STAGE OPERATION OF ALTO DO RODRIGUES PHOTOVOLTAIC PLANT (UFV-AR) – PRELIMINARY RESULTS

Abstract. This paper presents preliminary data and information already available since the beginning of operation of Alto do Rodrigues Photovoltaic Plant (UFV-AR), a pilot plant which was built within the scope of a project for Research and Development of Petrobras at ANEEL. The UFV-AR plant is composed by four generators subsystems, each with specific technical characteristics: installed capacity, technology of modules, and mounting structures. In this paper, it is presented some analysis and comparisons made on the first data obtained during its first months of operation, specifically for some selected days. The goal is to present a first overview of the operational behavior of the plant, discussing, on a preliminary basis, some of the first quantitative parameters and performance rates concerning electricity generation.

Key words: Photovoltaic Power Plant, Implementation and Operation, Operational Performance