

A AVALIAÇÃO DE LONGO PRAZO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO À EDIFICAÇÃO URBANA E CONECTADO À REDE ELÉTRICA PÚBLICA

Lucas Rafael do Nascimento – nascimento.ufsc@gmail.com

Ricardo Ruther - ruther@mbox1.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Resumo. A geração fotovoltaica (FV) é uma fonte de energia elétrica que converte diretamente a energia do sol de forma silenciosa, não poluente e sem utilizar partes móveis. Isto faz esta fonte de energia uma alternativa extremamente confiável e robusta, com baixa necessidade de operação, manutenção e reposição (OM&R). A confiabilidade associada aos geradores FV envolve todos os componentes do sistema, sejam eles: módulos FV, condutores, caixas de junção, inversores, dispositivos de proteção e sistemas de aquisição de dados. Todos estes itens são sujeitos a falhas e sua vida útil está muito relacionada às características climáticas de onde estes se encontram instalados, além das influências elétricas do próprio sistema FV, como da rede elétrica. Módulos FV possuem garantia de sua potência nominal de tipicamente 20 a 30 anos. Os fabricantes, devido à grande capacidade instalada de seu produto, além de extensos testes realizados em laboratório, podem a princípio garantir que os módulos FV irão se comportar dentro dos padrões indicados em seus contratos de garantia. Fabricantes de equipamentos normalmente se amparam em testes de MTBF - Mean time between failures (tempo médio entre falhas) para prever a frequência de falhas de seus produtos. Diversos parâmetros de OM&R utilizados no dimensionamento e análise econômica dos sistemas FV são tipicamente fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos além dos resultados apresentados na literatura. Muitas vezes alguns parâmetros de desempenho são negligenciados na simulação da avaliação do sistema. Os principais parâmetros utilizados são: degradação do módulo FV ao longo dos anos; indisponibilidade do sistema em função de falhas no gerador, inversor ou rede elétrica; vida útil dos inversores; limpeza do sistema em função do acúmulo de sujeira nos módulos, temperatura operacional, distribuição espectral da radiação local, entre outros. Grande parte dos sistemas FV utilizados como estudo de caso para determinação dos parâmetros de OM&R de um sistema são instalados em regiões que não apresentam as mesmas características climáticas experimentadas por sistemas FV instalados no Brasil. Neste caso, a utilização de tais parâmetros pode levar a incertezas na expectativa de geração de energia e avaliação econômica do sistema FV. Este trabalho avalia os dados provenientes dos 15 anos de operação ininterrupta do primeiro sistema FV integrado a uma edificação instalado no Brasil. O gerador FV de 2kWp instalado em Florianópolis opera desde setembro de 1997 e é composto por 54 módulos opacos e 14 módulos semitransparentes de silício amorfo a-Si de junção dupla. Foram levantados, a partir dos dados medidos pelo sistema, os principais parâmetros relacionados a OM&R de um gerador FV integrado a uma edificação e interligado à rede elétrica. Foram avaliados, ainda, dados históricos de irradiação solar incidente no plano do sistema fotovoltaico.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Confiabilidade de Sistemas Fotovoltaicos, Operação, Manutenção e Reposição (OM&R).

1. INTRODUÇÃO

Módulos FV possuem garantias de tipicamente 20 a 30 anos de sua potência nominal e a eletrônica de potência associada ao sistema também possui elevada confiabilidade. Devido a estas características e aos decrescentes custos de aquisição do sistema, a capacidade instalada da tecnologia FV cresce mundialmente. Diversos parâmetros de OM&R utilizados no dimensionamento e análise econômica dos sistemas FV são fornecidos pela literatura técnica ou fabricante dos equipamentos (e.g. degradação dos módulos FV ou MTBF dos inversores), mas são muitas vezes negligenciados na simulação do desempenho de um gerador solar. Os principais parâmetros utilizados na simulação do desempenho de um gerador solar no longo prazo são: degradação apresentada pelo módulo FV ao longo dos anos; indisponibilidade do sistema em função de falhas no gerador, inversor ou rede elétrica; vida útil dos inversores; limpeza do sistema em função do acúmulo de sujeira nos módulos, temperatura de operação, distribuição espectral da radiação solar local, entre outros.

Grande parte dos sistemas FV utilizados como estudo de caso para determinação dos parâmetros de OM&R são instalados em regiões que não apresentam as mesmas características climáticas experimentadas por sistemas FV instalados no Brasil. Neste caso, a utilização de tais parâmetros pode levar a incertezas na avaliação técnica e econômica do sistema FV.

2. SISTEMA 2KWP DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

O primeiro sistema FV conectado à rede (SFVCR) e integrado a uma edificação instalado no Brasil foi colocado em operação em setembro de 1997 no Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR), localizado no prédio de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Florianópolis (Rüther, 1998; Rüther e Dacoregio, 2000).

O sistema de 2 kWp é composto por módulos opacos e semitransparentes de filme fino de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), com células de junção dupla depositadas em vidro (módulos vidro-vidro sem moldura), inversores e sensores de irradiância, global e total (horizontal e inclinada), e de temperatura ambiente e do módulo. O painel FV está orientado para o Norte verdadeiro, com inclinação igual à latitude local (27°) e pode ser visto na Figura 1, na qual se nota a diferença de sombreamento proporcionada pelos módulos opacos e pelos semitransparentes na fachada vertical da edificação. O gerador FV vem sendo continuamente monitorado desde sua instalação, acumulando dados de desempenho elétrico, temperatura e irradiância a intervalos de tempo definidos.



Figura 1 - Primeiro sistema FV conectado à rede instalado no Brasil (1997), com módulos de filme fino de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) integrados a uma edificação.

O projeto original do sistema 2 kWp foi realizado de forma que fosse composto por quatro subsistemas, utilizando quatro inversores de 650 W em vez de um único inversor com a potência total do painel FV. Essa estratégia de projeto foi inicialmente empregada de modo a minimizar o risco de parada total de operação, com consequente perda de geração, em caso de falha no inversor, fabricado no exterior e para o qual não haveria assistência técnica de forma rápida no país. Além disso, como cada inversor de 650 W era alimentado por um painel de 500 Wp, em caso de falha de um dos inversores os módulos correspondentes poderiam ser distribuídos pelos outros três inversores mantendo o sistema em operação com a mesma potência instalada. Esse subcarregamento dos inversores também permitia que os mesmos operassem perto do ponto de maior eficiência, que está situado abaixo do máximo valor especificado de potência (Burger e Rüther, 2006).

O painel de cada um dos quatro subsistemas foi montado com módulos de filme fino de silício amorfo (a-Si), opacos e semitransparentes (RWE ASE-30-DG-UT). Os módulos possuem células de junção dupla, depositadas em vidro, formando uma estrutura vidro-vidro sem moldura.

Foram formados três subsistemas, cada um com 16 módulos opacos (16x32 Wp), e o quarto com 20 módulos, dos quais 6 são opacos (6x32 Wp) e 14 semitransparentes (14x27 Wp), sendo a potência fotovoltaica total instalada igual a 2.106 Wp.

O sistema possui sistema de aquisição de dados que coleta e armazena, a cada quatro minutos, os valores de grandezas elétricas c.c. e c.a., da irradiação global horizontal e total (no plano do painel FV, cuja inclinação é 27°) e das temperaturas do ambiente e dos módulos. A Figura 2 mostra o diagrama original do SFVCR de 2kWp.

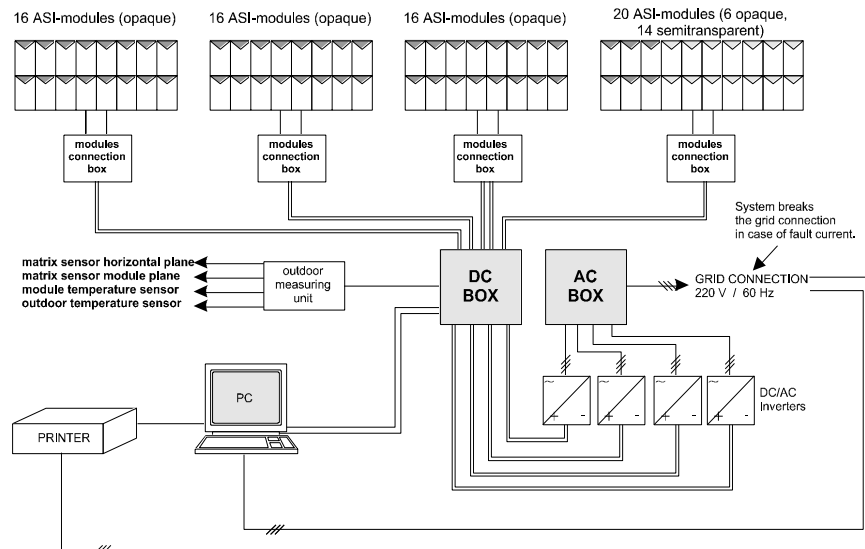


Figura 2 - Diagrama original do SFVCR de 2 kWp, em operação de 1997 a 2008 (Rüther, 1998)

O sistema operou, com a configuração original de quatro subsistemas, de setembro de 1997 até fins de 2008. Ao longo desse período de 11 anos de operação foram detectadas algumas poucas interrupções de geração que foram rapidamente solucionadas e o sistema foi mantido configurado como instalado, demonstrando a elevada confiabilidade de um gerador deste tipo.

No final de 2008, dois inversores que já operavam continuamente por 11 anos, apresentaram falhas, o que levou a uma reestruturação do sistema, pois não havia possibilidade de consertar ou substituir os inversores originais, uma vez que os mesmos já não eram mais fabricados há alguns anos. Um novo e mais moderno inversor de alta eficiência, de 2500 W, substituiu os quatro inversores originais, de 650 W e baixa tensão CC de entrada (30 V), todos já com 11 anos de operação. Com essa substituição, foi necessário reorganizar as ligações elétricas entre os módulos FV e formar um painel com 468 V, compatível com a tensão CC de entrada do novo inversor. O sistema passou a operar com cinco conjuntos em paralelo de 13 módulos em série, sendo quatro séries de 13 módulos opacos (4x13x32 Wp) e uma série de 13 módulos semitransparentes (13x27 Wp), formando um painel com potência FV de 2.015 Wp. Foram também adicionados ao sistema novos sensores de irradiância e de temperatura ambiente e do módulo. O novo diagrama elétrico do sistema está mostrado na Figura 3.

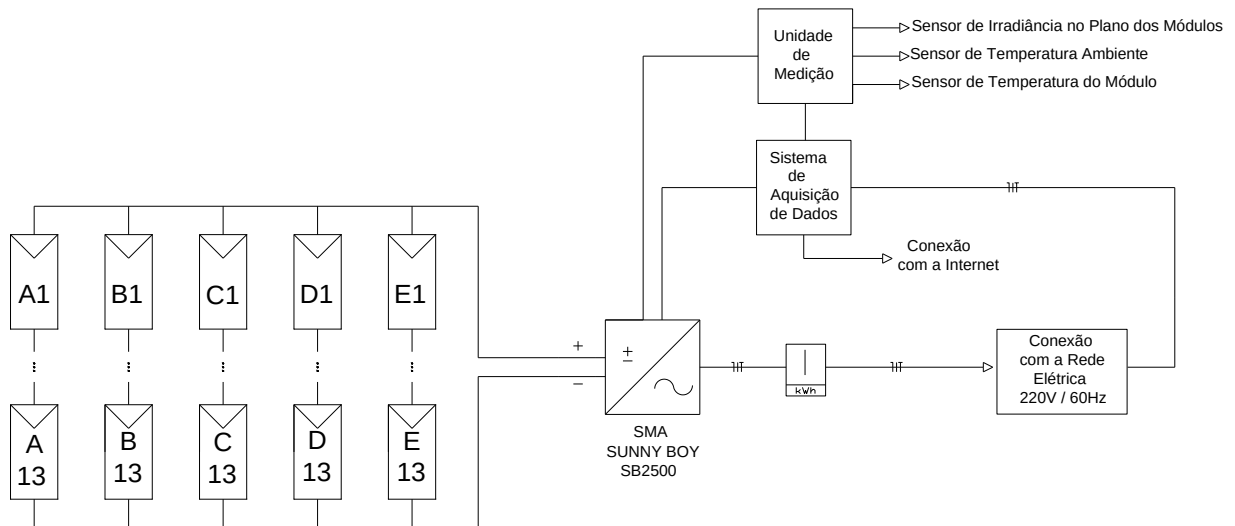


Figura 3 - Novo diagrama elétrico do sistema de 2 kWp, em operação a partir de 2009 (Viana et al., 2012)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Indisponibilidade do sistema

Os índices de indisponibilidade do sistema foram divididos em três classes: indisponibilidade por desligamento da rede elétrica, desligamento pelo usuário ou desligamento por falha no sistema.

Aqueles relacionados ao desligamento da rede elétrica são ocasionados por manutenções preventivas na rede elétrica do edifício ao qual o sistema FV encontra-se conectado ou a interrupções causadas por falha da concessionária.

No caso dos índices de indisponibilidade relacionados ao desligamento pelo usuário, estes são ocasionados em virtude de testes ou ensaios realizados com o gerador FV. Os relacionados à falhas no sistema, por sua vez, são ocasionados por falhas em algum componente do sistema FV; são interrupções alheias à vontade do operador ou à disponibilidade da rede elétrica pública.

A Figura 4 ilustra os índices de indisponibilidade relacionados às três classes acima mencionadas.

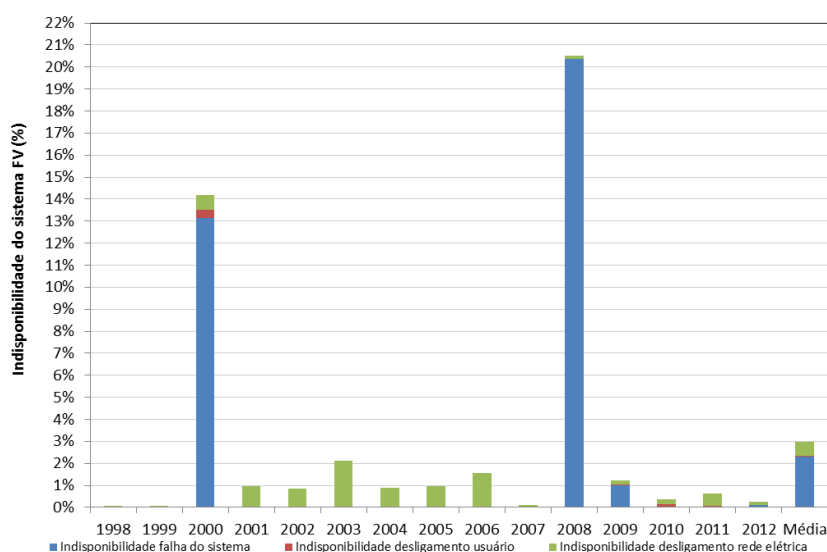


Figura 4 - Índice de indisponibilidade do sistema FV.

O sistema FV apresentou índices de indisponibilidade durante o período analisado, correspondendo a aproximadamente 3,0% da energia total gerada ao longo dos 15 anos de operação. O índice de indisponibilidade associado à falha na rede elétrica pode ser observado em todos os anos de operação do sistema FV. Este corresponde a aproximadamente 0,6 % da energia gerada pelo sistema durante o período analisado.

O índice de indisponibilidade associado ao desligamento pelo usuário corresponde a aproximadamente 0,1 % da energia não gerada pelo sistema durante o período analisado.

A respeito dos índices de indisponibilidade ocasionados por falhas no sistema, durante sua operação, o sistema FV sofreu cinco falhas em seus componentes, acarretando perdas parciais de potência ou seu total desligamento. Nos anos de 2000 e 2008, os índices de indisponibilidade foram associados a falhas nos inversores. No ano de 2000, em decorrência de uma falha em um dos quatro inversores instalados, um novo inversor precisou ser importado para substituí-lo. O tempo total até a substituição do equipamento foi de, aproximadamente, 1750 horas. Este total de horas é relativo ao período estimado de operação do inversor, durante a disponibilidade da irradiação solar. Devido ao longo período de indisponibilidade, esta representou cerca de 13,2% do total da energia gerada pelo sistema durante o ano em que foi verificada.

No ano de 2008, falhas intermitentes foram verificadas em dois dos quatro inversores que compunham o sistema. Um novo inversor foi importado e instalado em substituição a estes. O sistema foi redimensionado e um novo sistema de aquisição de dados instalado. O tempo de indisponibilidade do sistema foi de aproximadamente 615 horas. O período total de indisponibilidade ocasionado pela substituição representou aproximadamente 20,4% do total da energia gerada pelo sistema durante o ano em que esta foi verificada.

Nos anos de 2009 e 2012 o sistema apresentou falhas nos conectores dos módulos FV. Por apresentarem padrão antigo de produção, os módulos não dispunham de caixas de conexão, possuindo conectores positivos e negativos em suas extremidades. Estes conectores destacaram-se do módulo, ocasionando falha da *string* a que estes se encontravam conectados. A indisponibilidade ocasionada pelas falhas nos conectores representou 1% e 0,1% do total da energia gerada pelo sistema nos anos de 2009 e 2012, respectivamente.

Além das falhas nos inversores e conectores, no ano de 2009, um dos módulos FV foi trincado, possivelmente, pela dilatação térmica de uma das estruturas metálicas que o sustentava. O problema foi identificado pela baixa isolamento medida pelo inversor em dias de tempo chuvoso. A falha não ocasionou perdas notáveis de geração de energia pelo sistema.

Ante ao exposto, verifica-se que os índices de indisponibilidade relacionados a falhas no sistema são relativos, sobretudo, ao tempo de resposta da manutenção dos mesmos e menos à frequência com que estas ocorrem, tendo em vista que as cinco falhas mencionadas distribuem-se ao longo dos 15 anos de operação analisados, índice baixo para o período considerado. O índice de indisponibilidade identificado é decorrente, sobretudo, da necessidade de importação dos inversores para a substituição dos que apresentaram defeito. Caso estes estivessem disponíveis, na ocasião, no mercado nacional, o índice do sistema poderia ter sido de apenas 0,75%.

3.2 Índices de desempenho

A Taxa de Desempenho – TD do sistema é o quociente entre a geração real em C.A (e.g. kWh/ano) de um sistema FV com a geração esperada em função da potência nominal do gerador (kWp) e é, portanto, um parâmetro adimensional.

A Produtividade (*Yield*) de um gerador solar FV, é medida em kWh/kWp, e é influenciada principalmente pelo total da irradiação incidente.

A TD e Yield do gerador FV e sua comparação com dados de irradiação, são mostrados na base anual na Figura 5. A partir de 1998 depois de boa parte do Efeito Staebler-Wronski (SWE) (Staebler e Wronski, 1977) ter se estabilizado, excluindo-se o primeiro ano calendário e os anos com falhas nos inversores, a TD do sistema oscilou entre 79% e 73%, com média dos 15 anos avaliados de aproximadamente 74% para dados medidos e 76% para a TD estimada, indicando um excelente desempenho do gerador após 15 anos de operação.

A Produtividade (*Yield*), também visto na Figura 5, excluindo-se o primeiro ano calendário e os anos com falhas nos inversores, variou entre um valor mínimo de 1.072 kWh/kWp e um valor máximo de 1.205 kWh/kWp, com média dos 15 anos avaliados de 1.126 kWh/kWp. O *Yield* do sistema para os 15 anos estimado com base na projeção de desempenho dos anos em que foram identificadas falhas nos inversores, é de 1.159 kWh/kWp.

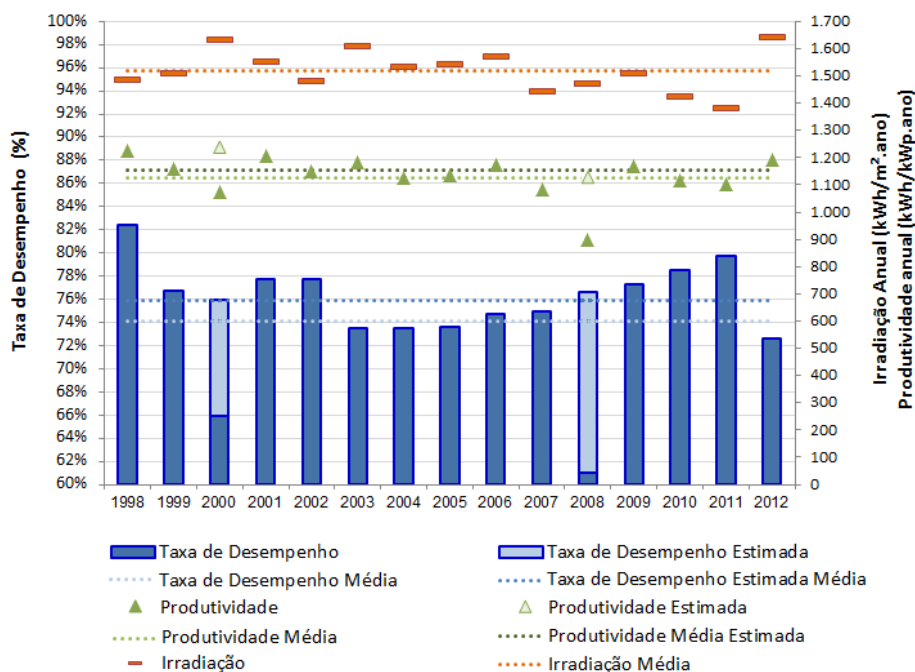


Figura 5 - Taxa de Desempenho (TD) e Produtividade (*Yield*) do sistema de 2 kWp ao longo dos 15 anos de operação (1997 a 2012).

Através do SWE, os módulos FV de filmes finos de a-Si:H sofrem uma perda de desempenho ao longo do primeiro ano de exposição ao sol e este efeito estabiliza após este período. O SWE é reversível pela exposição do filme fino a uma temperatura de 150°C por duas horas (recozimento) no escuro. Na operação em campo, sabe-se que as temperaturas elevadas (cerca de até 70 °C), sob as quais os módulos podem chegar a operar em climas quentes e ensolarados, levam a um recozimento parcial do filme fino e à estabilização do SWE em um patamar

mais elevado do que quando o mesmo dispositivo opera em climas mais frios (RÜTHER E LIVINGSTONE, 1994), (RÜTHER, 1995), (RÜTHER *ET AL.*, 2003), (RÜTHER, DACOREGIO *ET AL.*, 2004).

3.3 Degradação do sistema FV

Devido ao efeito SWE, os módulos FV apresentaram marcante queda de desempenho observada nos primeiros meses de sua operação. Após esse período inicial o desempenho passou a ser influenciado pela temperatura e pelo espectro da radiação solar, apresentando variações sazonais típicas do silício amorfo (a-Si) (Rüther e Livingstone, 1995), (Cereghetti et al., 2000), comportamento que se reflete em geração relativa mais elevada durante os meses de verão. Isso é devido às temperaturas de operação mais elevadas, que ocasionam o recozimento térmico parcial e a consequente reversão parcial da degradação, bem como aos efeitos do conteúdo espectral da radiação, pois o menor valor de Massa de Ar (*Air Mass* - AM) no verão leva o espectro a desviar para os menores comprimentos de onda (mais fótons na faixa do azul), o que é benéfico para o a-Si. (Gottschalg et al., 2005; Gottschalg et al., 2003; Rüther et al., 2002)

Os efeitos mencionados podem ser observados na potência CC normalizada do gerador FV, obtida pela relação entre a potência medida e a potência nominal declarada pelo fabricante, e a temperatura dos módulos, para o período de 1997 a 2012.

A variação sazonal do desempenho deste gerador, mostrada na Figura 6, com máximos durante os meses de verão e mínimos durante os meses mais frios de inverno, é o inverso ao observado tipicamente para geradores FV que utilizam a tecnologia mais tradicional do silício cristalino (c-Si), cujo desempenho é superior nos meses de inverno.

Este efeito inverso, observado na tecnologia de filmes finos de a-Si, pode ser explicado por dois fatores que se somam: o conteúdo espectral da radiação solar nos meses de verão que é deslocado para comprimentos de onda menores (composição espectral mais azul), que é mais próximo da resposta espectral dos dispositivos de a-Si e, também, as temperaturas mais elevadas do verão, que causam recozimento parcial do SWE dos filmes finos de a-Si, restaurando parcialmente o seu desempenho (Rüther e Livingstone, 1995), (King et al., 2000).

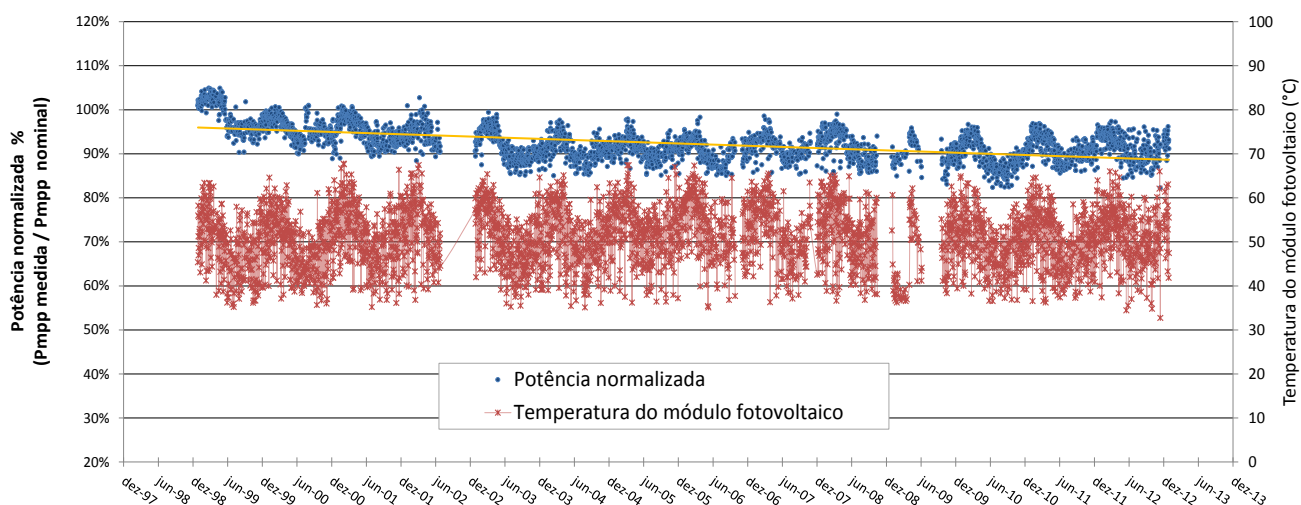


Figura 6 - Degradação da potência do módulo FV ao longo dos anos - potência CC normalizada e temperatura dos módulos, para o período de 1997 a 2012.

Estas duas características da tecnologia a-Si são de difícil modelagem matemática para se determinar as influências isoladas de cada um destes fatores.

A análise de degradação de potência do gerador FV foi realizada, excluindo-se o primeiro ano calendário de operação, devido ao período de estabilização do SWE. A partir da linha de tendência gerada para a potência normalizada, para o período de 1999 a 2012 verificou-se um decaimento de cerca de 0,55 % a.a dos dados medidos.

Isto mostra que a expectativa de degradação informada pelo fabricante, com degradação prevista na garantia de 10% nos primeiros 10 anos de operação e 20% ao longo de 20 anos, mostra um cenário pessimista de degradação para o módulo FV em questão. O índice de degradação encontrado também se apresenta abaixo das médias encontradas na literatura para a tecnologia dos filmes finos (1,5% a.a na média e 1,0% na mediana) e se mostra muito próximo dos índices apresentados para c-Si (0,7% a.a. na média e 0,5% na mediana) (Jordan e Kurtz, 2013). Além disso, todos os fabricantes da tecnologia a-Si fornecem módulos FV com potência inicial

(não-estabilizada) de 15 a 25% acima da potência nominal de placa, para levar em conta o SWE (Rüther et al., 2003).

3.4 Sujeira no sistema FV

O Sistema FV de 2kWp avaliado, somente é limpo pela lavagem natural ocasionada pela chuva. A última limpeza manual realizada no sistema foi feita há cerca de dois anos antes da avaliação conduzida neste trabalho. Como pode ser observado na Figura 7 há em praticamente todos os módulos uma distribuição uniforme de sujeira que se encontra impregnada sobre os mesmos.



Figura 7 - Distribuição uniforme de sujeira sobre o gerador FV.

Para a avaliação de redução de desempenho ocasionada pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos FV, foram avaliadas as curvas IxV das cinco *strings* que compõem o sistema, antes e imediatamente após sua limpeza.

A limpeza do sistema foi realizada utilizando-se água e pano macio. Para o gerador FV de cerca de 40m², foi necessário o trabalho de duas pessoas por aproximadamente 1h e cerca de 100 litros de água. Observou-se que determinados tipos de sujeira se encontravam impregnados sobre os módulos, sendo sua remoção possível somente com a utilização do material acima citado, uma vez que a ação da chuva, por exemplo, não é suficiente para a limpeza.

Os dados elétricos obtidos das *strings* antes e após a limpeza são apresentados na Tabela 1. Observa-se que os valores médios de I_{sc} e P_{mpp} após a limpeza do sistema tiveram uma melhora de aproximadamente 5,3%. A variação percentual de cerca de 0,7% observada na V_{oc} é resultado das incertezas de medição da temperatura e sua não homogeneidade na temperatura de módulos de uma mesma string (± 3 °C), devido a influência da laje de concreto sob o qual o sistema é fixado. O fator de forma não teve alterações significativas após a limpeza do sistema.

Tabela 1 - Dados elétricos das *strings* antes e após limpeza

	T mod °C	E eff W/m ²	Isc STC (A)		Voc STC (V)		Imp STC (A)		Vmpp STC (V)		Pmpp STC (W)		Fill factor (%)	
String 1 - Limpa	61	1001	1,15	5,7%	611,44	0,7%	0,88	5,7%	404,84	0,7%	354,4	6,5%	50,2	0,0%
String 1 - Suja	57	991	1,09		607,10		0,83		401,85		332,9		50,3	
String 2 - Limpa	60	986	1,14	5,8%	609,30	1,0%	0,86	6,1%	401,50	0,4%	344,9	6,6%	49,7	-0,3%
String 2 - Suja	57	997	1,07		603,36		0,81		399,80		323,5		49,9	
String 3 - Limpa	60	1003	1,14	4,9%	615,28	0,0%	0,86	4,9%	410,81	0,1%	351,6	5,1%	50,3	0,2%
String 3 - Suja	58	1001	1,08		615,54		0,82		410,23		334,7		50,2	
String 4 - Limpa	60	991	1,11	5,7%	614,62	-3,2%	0,82	5,6%	405,13	-1,6%	330,7	3,9%	48,7	1,6%
String 4 - Suja	58	951	1,05		635,14		0,77		411,68		318,2		47,9	
String 5 - Limpa	60	1014	0,97	4,9%	604,96	-2,0%	0,73	5,9%	404,54	-1,5%	295,6	4,3%	50,5	1,4%
String 5 - Suja	57	984	0,92		617,26		0,69		410,66		283,5		49,8	
Média				5,4%		-0,7%		5,6%		-0,4%		5,3%		0,6%

A melhora identificada no desempenho, de aproximadamente 5,3%, é coerente com outras limpezas realizadas anteriormente no mesmo sistema e pode ser justificada em virtude da maior incidência da irradiação solar no módulo FV, antes atenuada pela uniforme distribuição de sujeira sobre este. Este aumento no desempenho do sistema ocasionado pela limpeza resultará, de maneira geral, em um aumento da produção de energia do sistema de também 5,3%.

Assumindo que este ganho de produtividade se manteve constante desde a limpeza no sistema, realizada há cerca de dois anos, isto representaria aproximadamente 220kWh de energia que deixou de ser gerada em função das perdas associadas à sujeira. Admitindo um sistema FV conectado à rede elétrica, utilizando o sistema de compensação de energia estabelecido pela Resolução Normativa 482/2012 (Aneel, 2012), e um custo de energia de aproximadamente 0,35 R\$/kWh para a cidade de Florianópolis (Montenegro, 2013), isto representaria cerca de R\$75,00 de receita não realizada. Assumindo que os materiais utilizados para a limpeza sejam de uso cotidiano, e que exista disponibilidade de água, os custos principais a serem comparados seriam do equivalente “hora-homem” em uma atividade em altura, tendo em vista, que a sujeira do módulo exige certa pressão para ser completamente removida, o que dificilmente seria possível em uma tentativa de limpeza a nível do solo, utilizando acessórios para alcançar o sistema. Fica evidente portanto que o benefício da limpeza manual de um sistema solar fotovoltaico sob condições como as apresentadas neste trabalho é questionável.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu os resultados de 15 anos de operação do primeiro gerador fotovoltaico com módulos de a-Si, conectado à rede elétrica e integrado a uma edificação no Brasil.

O sistema FV apresentou, em média, ao longo do período considerado, taxa de desempenho (TD) de 74% para dados medidos e 76% para dados estimados, oscilando entre 79% e 73%, indicando um excelente desempenho do gerador após 15 anos de operação.

A Produtividade (*Yield*) variou entre um valor mínimo de 1.072 kWh/kWp e um valor máximo de 1.205 kWh/kWp, com média dos 15 anos avaliados de 1.126 kWh/kWp. O *Yield* do sistema, estimado com base na projeção de desempenho dos anos em que foram identificadas falhas nos inversores, é de 1.159 kWh/kWp. Os principais componentes que levaram à falha e indisponibilidade do sistema foram avaliados, assim como a frequência de interrupções causadas pelo usuário e rede elétrica.

Constatou-se que o sistema FV apresentou índices de indisponibilidade durante o período analisado, correspondendo a aproximadamente 3,0% da energia total gerada ao longo dos 15 anos de operação. Verificou-se, ainda, que os índices de indisponibilidade relacionados a falhas no sistema são relativos, sobretudo, ao tempo de resposta da manutenção dos mesmos e menos à frequência com que estas ocorrem, tendo em vista que somente cinco falhas, duas relacionadas a falhas no inversor, duas relacionadas a falhas nos conectores e uma associada a uma trinca no módulo FV, foram identificadas ao longo dos 15 anos de operação analisados. O índice de indisponibilidade identificado é decorrente da necessidade de importação dos inversores para a substituição dos que apresentaram defeito. Caso estes estivessem disponíveis, na ocasião, no mercado nacional, o índice do sistema poderia ter sido de apenas 0,75%.

Foram avaliados, ainda, os impactos da sujeira acumulada sobre os módulos FV e a respectiva redução de desempenho destes. Os resultados indicaram que a sujeira encontrava-se uniformemente distribuída no sistema FV, sem causar descasamentos elétricos de tensão e corrente entre módulos limpos e módulos sujos. O sistema FV, após sua completa limpeza, teve melhora em seu desempenho de aproximadamente 5,3%. Apesar de tal número parecer expressivo, o aumento na geração de energia, comparado aos custos inerentes ao processo de limpeza, na maior parte dos casos, não justifica o investimento neste procedimento.

A avaliação de degradação do gerador FV utilizando dados de potência normalizada do sistema, apresentou decaimento de cerca de 0,55 % a.a dos dados medidos. O índice de degradação encontrado apresenta-se bastante inferior àquele informado pelo fabricante, de cerca de 1% ao ano para fins de garantia do produto. Este valor também se apresenta abaixo das médias encontradas na literatura para a tecnologia dos filmes finos (1,5% a.a na média e 1,0% na mediana) e se mostra muito próximo dos índices apresentados para c-Si (0,7% a.a. na média e 0,5% na mediana).

Durante os 15 anos de dados de irradiação medidos, observou-se uma irradiação anual média de 1527kWh/m². A variação interanual (entre anos), mensal foi, em média, 10,6%.

As taxas de desempenho apresentadas e os índices de degradação encontrados demonstram que a tecnologia de a-Si é bem adequada para instalações integradas no ambiente urbano no Brasil. Considerando a confiabilidade e o desempenho apresentados, até a falha de dois inversores em 2008, a estratégia inicial do projeto, com quatro inversores de 650 W em vez de um único inversor de 2000 W, pode ser considerada desnecessária uma vez que os quatro inversores operaram de forma eficiente e contínua, demonstrando um alto grau de confiabilidade e robustez.

Este trabalho apresentou uma contribuição ao conhecimento do desempenho de longo prazo da geração solar fotovoltaica no Brasil, demonstrando que esta tecnologia apresenta elevados índices de confiabilidade e desempenho. No momento em que o Brasil dá seus primeiros passos na utilização desta tecnologia, com a recente publicação da Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL e a iminência da utilização da geração solar em usinas de maior porte, este trabalho traz informações que podem ser consideradas de grande relevância para o desenvolvimento da geração FV no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.
- Burger, B.; Rüther, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. **Solar Energy**. Issue 1, v.80, p.32-45, 2006.
- Cereghetti, N.; Chianese, D.; Rezzonico, S.; Travaglini, G. **BEHAVIOUR OF TRIPLE JUNCTION a-Si MODULES**: 16th European PV Solar Energy Conference. Glasgow (UK), 2000.
- GOTTSCHALG, R.; BETTS, T. R.; INFELD, D. G.; KEARNEY, M. J. The effect of spectral variations on the performance parameters of single and double junction amorphous silicon solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Issue 3, v.85, p.415-428, 2005.
- GOTTSCHALG, R.; INFELD, D. G.; KEARNEY, M. J. Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Issue 4, v.79, p.527-537, 2003.
- JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. Issue 1, v.21, p.12-29, 2013.
- KING, D. L.; KRATOCHVIL, J. A.; BOYSON, W. E. Stabilization and performance characteristics of commercial amorphous-silicon PV modules. In: Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 2000. **Anais.**, 2000.v.p. 1446-1449.
- MONTENEGRO, A. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. Eng. Civil, UFSC, 2013. 175 p.
- RÜTHER, R. Experiences and operational results of the first grid-connected, building-integrated, thin-film photovoltaic installation in Brazil. In: 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion – WCPEC2, 1998. **Anais**. Vienna – Austria, 1998.v.p.
- RÜTHER, R.; DACOREGIO, M. M. Performance assessment of a 2 kWp grid-connected, building-integrated, amorphous silicon photovoltaic installation in Brazil. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. Issue 2, v.8, p.257-266, 2000.
- RÜTHER, R.; KLEISS, G.; REICHE, K. Spectral effects on amorphous silicon solar module fill factors. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Issue 3, v.71, p.375-385, 2002.
- RÜTHER, R.; LIVINGSTONE, J. Seasonal variations in amorphous silicon solar module outputs and thin film characteristics. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Issue 1, v.36, p.29-43, 1995.
- RÜTHER, R.; TAMIZH-MANI, G.; DEL CUETO, J.; ADELSTEIN, J.; MONTENEGRO, A. A.; VON ROEDERN, B. Performance test of amorphous silicon modules in different climates: higher minimum operating temperatures lead to higher performance levels. In: Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on, 2003. **Anais.**, 2003.v.2. p. 2011-2014 Vol.2.
- STAEBLER, D. L.; WRONSKI, C. R. Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si. **Applied Physics Letters**. Issue 4, v.31, p.292-294, 1977.
- VIANA, T.; NASCIMENTO, L. R. D.; MONTENEGRO, A.; RÜTHER, R. SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2kWp INTEGRADO A EDIFICAÇÃO: ANÁLISE DO DESEMPENHO DE 14 ANOS DE OPERAÇÃO. In: IV CBENS e V Conferência Latino Americana da International Solar Energy Society - ISES, 2012. **Anais**. São Paulo - SP: ABENS - Associação Brasileira de Energia Solar, 2012.v.1. p. 8.

LONG-TERM ASSESMENT OF A BUILDING INTEGRATED, GRID CONNECTED PV SYSTEM

Abstract. Photovoltaic (PV) generation is an electric energy source that directly converts sun energy in a silent and clean way, avoiding the use of moving parts. This makes this energy source a highly reliable and robust alternative, with low requirements of operation, maintenance and replacement (OM&R). The reliability associated to PV generators involves all the system components, such as: PV modules, cables, junction boxes, inverters, protection devices and data acquisition systems. All those items can fail and their lifecycle is related to the climatic characteristics of where they are installed, and also to the electric influences of the PV system and the grid. PV modules typically have around 20 to 30 years nominal power warranty. The manufacturers, due to the large accumulated installed capacity, and extensive lab tests, can insure that PV modules will behave in accordance with the corresponding warranty contracts. Equipment manufacturers normally use MTBF (Mean Time Between Failures) tests to assess failures in the products. Many OM&R parameters used for the sizing and economic viability analysis of PV systems are normally provided by the equipment manufacturers, with results widely available on the specialized literature. Quite often, operational parameters are neglected in the simulation of system performance. The main parameters affecting the performance of a PV system are: degradation of the PV modules over the years; system unavailability due to failures at the generator, inverters or grid; inverters lifecycle; system cleaning due to the dirt accumulation at the modules,

operational temperature, spectral content of the solar irradiation at the site, among others. Most of the PV systems used as case studies for determination of the OM&R parameters of a system are installed in regions that do not present the same climatic characteristics experienced by PV systems installed in Brazil. In these cases, the use of those parameters can result in uncertainties on the expectation of energy generation and economic viability analysis of the PV systems. The present work aims to evaluate the 15 years of operational data provided by the first building-integrated PV system installed in Brazil. The 2kWp PV generator installed in Florianópolis, operates since September 1997 and is comprised by 54 opaque modules and 14 semitransparent, double-junction amorphous silicon (a-Si) modules. The main parameters which were analyzed in this work, using the data provided by the system, are related to the OM&R of a PV generator building-integrated and connected to the grid. Historical data of the solar irradiation at the plane of the PV system were also evaluated.

Key words: Photovoltaic Solar Energy, Photovoltaic Reliability, Operation, Maintenance and Replacement (OM&R).