

**MERCOFRIO 2014 – 9º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO**

**GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS EM
EDIFICAÇÕES: METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO**

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá – SC

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

Alexandre José Bühler – ajbuhler@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Bento Gonçalves

F5 – Envoltório de Edificações

Resumo. *A regulação do setor elétrico desempenha o importante papel de orientar os investimentos em diferentes fontes de energias em função das necessidades energéticas do país, incentivando o desenvolvimento de mercado para diferentes áreas, como é o caso da energia solar fotovoltaica. Para que esta fonte de energia limpa e considerada infinita se desenvolva no Brasil, assim como tem ocorrido em diversos outros países tais quais EUA, China e Alemanha, é fundamental implementar iniciativas que permitam com que esta fonte de energia concorra com a já consolidada energia hidrelétrica. Levar em conta as vantagens que a energia solar tem em relação a outras fontes de energia, como a questão da geração distribuída, é um passo importante e necessário para auxiliar na disseminação da energia solar fotovoltaica no Brasil. Este trabalho apresenta uma metodologia para análise do desempenho energético da geração distribuída com sistemas fotovoltaicos integrados em edificações no contexto do projeto nacional “120 telhados fotovoltaicos”.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Geração Distribuída, Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações.*

1. INTRODUÇÃO

Desde o surgimento das primeiras células solares fotovoltaicas, de elevado custo e utilizadas na geração de energia elétrica para os satélites que orbitam nosso planeta, as tecnologias de produção evoluíram e tornaram-se economicamente viáveis em diversas aplicações. Para que a tecnologia fotovoltaica tenha um futuro promissor como fonte de energia principal, deverá desenvolver-se a partir das experiências realizadas nos países que impulsionaram o mercado fotovoltaico. Os programas de apoio e incentivo criam economias de escala que por consequência reduzem os custos e impulsionam o mercado. Apesar de que os programas de mercado são desenvolvidos para serem unicamente meios de apoio temporários, são decisivos na formação de um mercado estável.

A regulação do setor elétrico desempenha o importante papel de orientar a evolução das energias em função das necessidades energéticas do país, incentivando sua produção em função do grau de desenvolvimento e interesse da mesma. Analisando a evolução da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo, fica evidente a importância que essa fonte de energia tem conquistado nos últimos anos na matriz energética de diversos países. No ano de 2000 a potência fotovoltaica instalada no mundo era de 1,4 GW, enquanto que no final de 2013 a potência instalada alcançou a incrível marca de 136,7 GW (EPIA, 2014).

A energia elétrica no Brasil é proveniente na sua maior parte de recursos hídricos. Atualmente, do total da capacidade instalada no Brasil, cerca de 136 GW, aproximadamente 86 GW (63 %) é devido a hidrelétricas (ANEEL, 2014). Em termos de geração de energia elétrica, as hidroelétricas tiveram participação de 81,8 % e 76,9 %, respectivamente nos anos de 2011 e 2012 (EPE, 2013). Para que a energia solar fotovoltaica assuma o papel de vetor de desenvolvimento tecnológico e industrial, é primordial desenvolver iniciativas que permitam uma análise sistemática da inserção dessa fonte na matriz elétrica nacional. É necessária uma análise quanto ao comportamento destas unidades de geração na malha de controle do Sistema Interligado Nacional (SIN), focando principalmente em questões técnicas como as particularidades do padrão de requerimento de conexão estabelecido pelas concessionárias. O atual processo de regulamentação elimina uma das maiores barreiras ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no Brasil. Krenzinger e Zilles (2012) estimam que no ano de 2020 os sistemas fotovoltaicos contribuam com cerca de 1 % a 2 % da geração de energia elétrica e que a potência acumulada será da ordem de 10 GW. Entre as principais iniciativas no país podem-se destacar a chamada nº 13/2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) denominada Projeto Estratégico: Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira, a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL e o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Módulos Fotovoltaicos e Inversores do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

2. FUNDAMENTOS

A energia solar fotovoltaica tem atributos que a tornam única. O fato de ser possível incrementar a produção tão rapidamente e a tecnologia se desenvolver a partir de infraestrutura existente faz com que a taxa de inovação no segmento seja muito maior que nos demais setores de energia. Na realidade, esta taxa situa-se mais próxima de setores como TI, com suas mudanças constantes. Além de uma extensa variedade de pesquisa em novas tecnologias, há constantes inovações na indústria que vêm reduzindo significativamente o custo por unidade de energia assegurada das tecnologias disponíveis comercialmente via novos produtos e processos de produção, disposição, comercialização, financiamento e instalação (ABINEE, 2012).

O grupo setorial de sistemas fotovoltaicos da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) elaborou um documento que traça um panorama da geração fotovoltaica no mundo e a potencialidade de sua implantação efetiva no Brasil, por meio de políticas específicas para o segmento, visando integrar esse sistema de geração à matriz elétrica (ABINEE, 2012).

A instalação de 2 GW até 2020 poderia criar condições de alavancar o desenvolvimento de uma cadeia produtiva local para produção de equipamentos, atraindo a atenção de atores globais para o Brasil. Simulações realizadas indicam que o valor de venda da energia para contrato com duração de 25 anos com montante igual à energia produzida pela usina (geração média igual a 18,5 % da capacidade instalada) para uma faixa de investimentos variando entre 4.000 R\$/kW e 6.000 R\$/kW, diferentes taxas de retorno e diferentes sistemas de amortização do financiamento, variam entre 242 R\$/MWh e 407 R\$/MWh (ABINEE, 2012).

Em 2012, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia (MME) divulgou nota técnica de análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira (EPE, 2012b). Este documento analisa a competitividade da geração fotovoltaica distribuída e centralizada. A Tabela 1 apresenta a competitividade da geração fotovoltaica distribuída no setor residencial, comercial e industrial.

Tabela 1. Competitividade da geração fotovoltaica distribuída em diferentes setores (EPE, 2012b).

Aplicação	Potência (kW _p)	Investimento (R\$)	Custo de Geração (R\$/MWh)
Residencial	5	38.000,00	602
	10	69.000,00	541
Comercial	100	591.000,00	463
Industrial	1.000	5.185.000,00	402

Para fins de avaliar a competitividade da geração fotovoltaica, o custo dessa geração deve ser comparado com a tarifa final paga pelo consumidor, isto é, a tarifa em que estão incluídos, a partir de determinação legal, os pagamentos compulsórios devidos ao poder público. A Tabela 2 sintetiza os valores médios regionais das tarifas obtidos a partir do cenário apresentado no documento da EPE, incluindo PIS/COFINS e ICMS, possibilitando uma visão geral dos níveis tarifários nos setores residencial, comercial e industrial.

Tabela 2. Valores médios das tarifas de energia elétrica em diferentes setores (EPE, 2012b).

Setor	Mínimo (R\$/MWh)	Máximo (R\$/MWh)	Médio (R\$/MWh)
Residencial	444	464	457
Comercial	387	443	406
Industrial	318	432	336

O custo estimado para a energia solar fotovoltaica centralizada é da ordem de R\$ 400,00/MWh podendo ser reduzido para R\$ 300,00/MWh considerando redução nos custos de investimentos devido à queda de preços e incentivos de diferentes natureza. Estes valores são significativamente altos em relação aos verificados nos últimos leilões de energia nova para o Ambiente de Contratação Regulado – ACR (na faixa aproximada de R\$ 95 e R\$ 110 por MWh), ou mesmo em relação ao Valor referência – VR para contratação pelas distribuidoras (da ordem de R\$ 151/MWh em 2011) (EPE, 2012b). O documento da EPE também apresenta inúmeras propostas de incentivos para a inserção da geração fotovoltaica na matriz elétrica.

O grupo de trabalho para energia solar da Associação da Indústria de Cogeração de Energia (GT COGEN SOLAR) também elaborou um documento sobre a inserção da energia solar no Brasil (COGEN, 2012). Os custos relacionados à geração fotovoltaica foram avaliados pelo GT COGEN SOLAR e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Custo da geração fotovoltaica em diferentes setores (COGEN, 2012).

Aplicação	Residencial	Comercial	Usina
Potência (kW)	3	30	30.000,00
Custo dos Módulos e Inversores (R\$)	11.605,00	116.047,00	116.047.414,00
Custo de Cabos e Proteções (R\$)	2.250,00	18.000,00	13.100.000,00
Custo de instalação (R\$)	3.750,00	24.000,00	14.000.000,00
Demais custos (R\$)	3.750,00	30.000,00	18.000.000,00
Total (R\$)	21.359,00	188.047,00	161.147.414,00
Total (R\$/W)	7,12	6,27	5,37

Em diferentes cenários desenvolvidos o GT COGEN SOLAR estima o custo produção de energia (R\$/kWh) por custo de investimento considerando fatores de capacidade variando entre 12 % e 18 % (Figura 1).

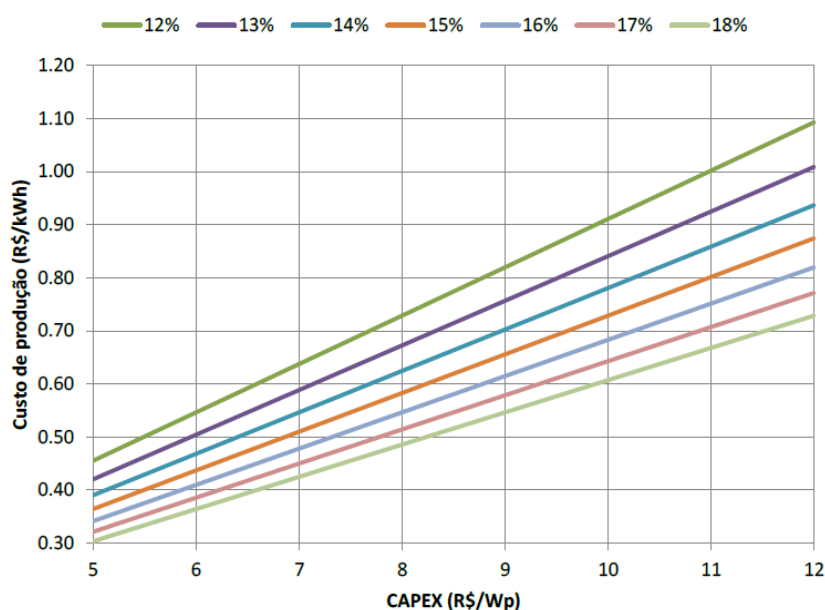


Figura 1. Custo de produção de energia por custo de investimento com diferentes fatores de capacidade (COGEN, 2012).

Zilles (2013) apresenta preços médios praticados no país para compras entre 0,5 MW e 1 MW de módulos fotovoltaicos e inversores. Estes preços médios são apresentados na Tabela 4 (módulos) e na Tabela 5 (inversores).

Tabela 4. Preço médio de módulos fotovoltaicos de diferentes fabricantes (Zilles, 2013).

Empresa	A	B	C	D	E	F	G
R\$/W _P (módulos)	3,07	3,28	3,33	3,38	3,53	3,82	3,90

Tabela 5. Preço médio de inversores por faixa de potência nominal (Zilles, 2013).

Potência (kW)	5 kW	15 kW	>100
R\$/W _P (inversores)	1,87	1,22	0,42

3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS EM EDIFICAÇÕES

A instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil é bastante recente, sendo que as primeiras experiências datam de meados da década de 90. A análise do comportamento de instalações fotovoltaicas conectadas à rede e de metodologias de caracterização e avaliação desses sistemas instalados é necessária para o conhecimento e aprendizado desses sistemas a fim de desenvolver a tecnologia e torná-la uma alternativa viável no âmbito do sistema energético do país.

Considerando que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de energia elétrica representam uma alternativa tecnicamente confiável para incrementar a contribuição das fontes renováveis na matriz elétrica, o objetivo geral do Projeto 120 telhados fotovoltaicos no Brasil é executar um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico

visando delimitar as condições e impactos da inserção de geração distribuída de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos em telhados de consumidores na rede de baixa tensão. A pesquisa visa não apenas o estudo da inserção da utilização de sistemas fotovoltaicos em redes de baixa tensão, mas também o enfrentamento de questões comerciais relacionadas a tarifas, aspectos regulatórios, demonstração e teste de sistemas alternativos de medição e gestão.

Os produtos deste projeto contemplam o desenvolvimento de procedimentos de monitoramento e estudo dos impactos da geração distribuída em alimentadores urbanos e subsidiarão futuras ações do Ministério de Minas e Energia (MME) na discussão junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de possíveis aprimoramentos quanto à regulamentação deste tipo de conexão. Especificamente, propõem-se: a implantação de sistemas fotovoltaicos instalados em áreas de concessão de geração de energia elétrica distintas, para garantir a instalação em áreas com diferentes padrões de conexão, o desenvolvimento de procedimentos de medição, gestão e operação de sistemas distribuídos em baixa tensão e avaliação do impacto da geração distribuída em alimentadores urbanos e estabelecimentos de competências para o desenvolvimento da geração distribuída com sistemas fotovoltaicos e formação de recursos humanos especializados.

A implantação dos sistemas envolve concessionárias de distribuição de energia elétrica dispostas a participar da pesquisa por meio da implantação de projetos piloto em sua área de concessão e que tenham experiências em projetos demonstrativos em geração distribuída. Para garantir a possibilidade de análise e comparação entre diferentes padrões adotados, as empresas envolvidas serão de regiões distintas. Os telhados fotovoltaicos serão instalados nos seguintes estados: Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e Pará.

Cada projeto piloto compreende a instalação de 20 sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados em telhados de consumidores de baixa tensão. Os estudos do Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos (GT-GDSF) do MME apontam para uma alternativa similar ao programa alemão, considerando as particularidades como as características da matriz energética brasileira e as especificidades do Sistema Interligado Nacional.

Os sistemas integrados a edificações são comumente encontrados em grandes centros urbanos e podem ser instalados nos telhados ou em fachadas de prédios. Nessas condições de instalação o projetista deve estar atento, inicialmente, à área disponível no telhado, onde se devem considerar aberturas utilizáveis presentes no telhado, e o sombreamento devido a estruturas vizinhas. A questão estrutural do telhado também é importante, pois é necessário o sistema estar orientado corretamente e a estrutura deve suportar uma carga extra de módulos e equipamentos. Os sistemas instalados no solo normalmente são implantados em localidades distantes dos grandes centros. Este é um sistema mais simples de ser instalado, pois apenas há a necessidade de uma área de terra disponível. Nessas condições ele irá ocupar a área de terra durante toda a sua vida útil de operação não sendo possível, a princípio, desenvolver nenhuma atividade extra no local durante esse período.

Quando a radiação solar incide perpendicularmente nos módulos, o sistema está recebendo a maior quantidade de radiação solar global possível e consequentemente gerando a maior potência. O ideal, portanto, é que o módulo fique o maior tempo possível voltado para o Sol. Esta condição é obtida com sistema de seguimento que compensam as variações azimutais e a declinação solar. Quando o sistema é instalado em telhados, normalmente os sistemas fotovoltaicos serão fixos e dificilmente esta condição poderá ser respeitada, pois dependerá do posicionamento do telhado, em relação ao Norte ou Sul geográfico e do espaço disponível no mesmo. Para sistemas fixos há recomendações fundamentadas em diversos estudos científicos para orientações e inclinações que otimizam a conversão de energia solar ao longo das variações anuais meteorológicas.

Em sistemas fixos os módulos fotovoltaicos devem ficar orientados para o Norte geográfico se forem instalados no hemisfério Sul do planeta e se o sistema for instalado no hemisfério Norte os módulos devem ser orientados para o Sul geográfico. Os telhados fotovoltaicos descritos neste trabalho serão fixos e instalados no sul do Brasil, portanto o sistema deverá ter orientação norte preferencialmente. Em termos gerais, os módulos são instalados com uma inclinação equivalente à latitude do local. A latitude de Porto Alegre, onde serão instalados os telhados fotovoltaicos, é de 30 graus e, portanto a inclinação do sistema deve ser desta ordem. Entretanto são admitidas, sem que haja grandes perdas para o sistema, variações máximas de $\pm 20^\circ$ em relação ao ângulo azimutal do sistema, e variações na inclinação de $\pm 10^\circ$ em relação à latitude.

Em Porto Alegre/RS serão instalados 20 telhados fotovoltaicos em diferentes residências, sendo que cada gerador terá uma potência nominal de 1,22 kW_p. Os geradores fotovoltaicos serão compostos por 5 (cinco) módulos YINGLI policristalino de potência nominal de 245 W_p modelo YL 245P-29b. A Tabela 6 apresenta as características elétricas em *Standard Test Conditions* (STC) e em *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT).

Tabela 6. Características elétricas do módulo fotovoltaico.

Parâmetro		STC	NOCT
Potência de Saída (W)	P _{AC}	245	177,9
Eficiência (%)	η	15	-
Tensão do PMP (V)	V _{PMP}	30,2	27,2
Corrente do PMP (A)	I _{PMP}	8,11	6,54
Tensão de Circuito Aberto (V)	V _{OC}	38,4	34,5
Corrente de Curto-circuito (A)	I _{SC}	8,79	6,99

Os inversores utilizados serão do fabricante SMA modelo *Sunny Boy* 1200 com potência nominal de 1,2 kW. A Tabela 7 apresenta os custos de aquisição, unitário e total, de 21 geradores fotovoltaicos e 22 inversores. Nas edificações serão instalados 20 telhados fotovoltaicos e um telhado fotovoltaico será instalado no LABSOL da UFRGS como telhado de referência.

Tabela 7. Custos de aquisição dos componentes dos telhados fotovoltaicos.

Item	Qtidade	Descrição	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
1	22	Inversores 1,2 kW _p – 220 V	3.234,67	71.162,74
2	21	Geradores fotovoltaicos 1,22 kW _p	3.158,19	66.321,99
		Total	6.392,86	137.484,73

Cada unidade consumidora (UC) participante possuirá um gerador fotovoltaico (gerador FV) de 1,2 kW_p e contará com dois medidores, além daquele fornecido pela concessionária local. Um dos medidores será responsável por coletar os dados provenientes do gerador FV, enquanto que o outro medidor será responsável por monitorar as grandezas de interesse da edificação. A configuração básica dos sistemas a serem instalados é apresentada no esquema da Figura 2 onde também é possível observar que o quadro c.a. (corrente alternada) abrigará o sistema para transmissão dos dados coletados pelos medidores.

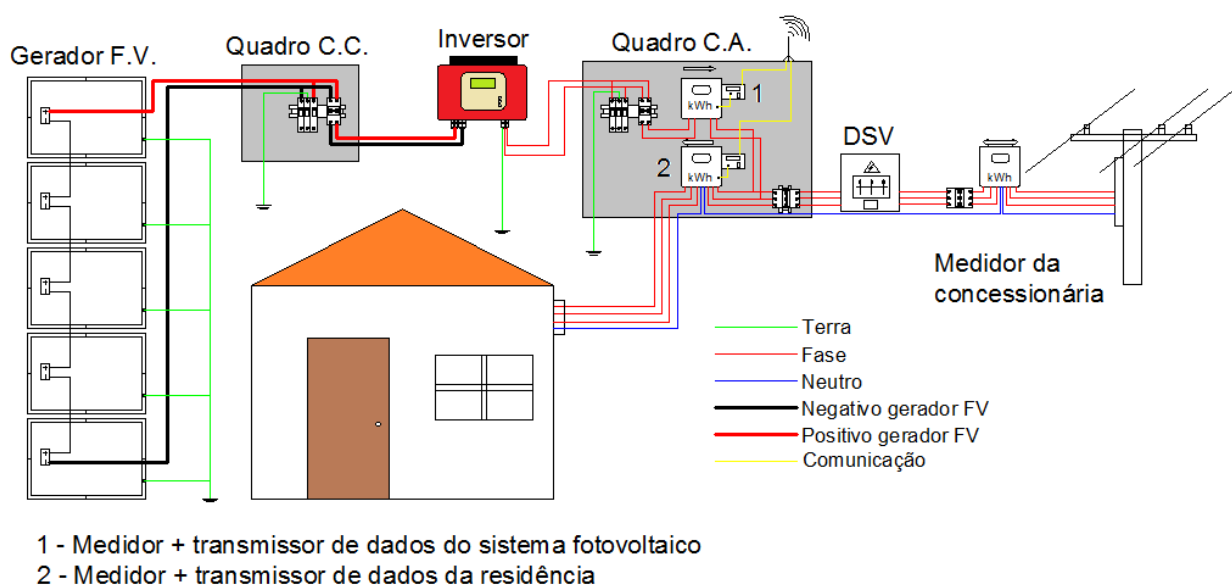


Figura 2. Esquema do SFCR a ser montado em cada unidade consumidora.

Cada gerador FV será conectado a uma caixa de conexão c.c. (corrente contínua) contendo os disjuntores e proteções, e suas saídas (polos positivo e negativo) serão direcionadas até o inversor. A caixa de conexão c.c. e o inversor deverão ser alocados preferencialmente sob o telhado onde os painéis fotovoltaicos forem instalados ou em uma região próxima ao respectivo gerador a que pertencem.

As saídas em c.a. serão enviadas por eletrodutos aparentes ou embutidos até o quadro de distribuição da residência. Além dos dispositivos de seccionamento e proteção contra sobrecorrente e surtos, as caixas de conexão também serão equipadas com barramentos de terra, e no caso do lado c.a., com os medidores para computar a produção de energia do SFCR e do consumo de energia elétrica total da edificação. Uma vez que os geradores fotovoltaicos serão instalados em residências, é de grande importância que a monitoração dos sistemas provoque pouca, ou nenhuma, interferência nestes ambientes, evitando quaisquer transtornos aos seus moradores. Os equipamentos de transmissão de dados de cada unidade consumidora participante do projeto serão capazes de enviar os dados coletados para um concentrador de dados, o qual será responsável por comunicar-se com o servidor que irá realizar o armazenamento destes dados e os disponibilizarão para os usuários cadastrados (pesquisadores) do projeto em questão (Figura 3).

Ambos os medidores estarão abrigados no quadro elétrico c.a., sendo que este quadro possuirá, além dos medidores, todos os equipamentos necessários à transmissão dos dados e os equipamentos de proteção (como chaves, fusíveis, disjuntores, DPS, entre outros) responsáveis por garantir a integridade dos medidores e transmissores de dados. Os transmissores de dados serão capazes de enviar as medições coletadas nas suas respectivas unidades consumidoras para o servidor, sem a utilização de quaisquer equipamentos e/ou infraestrutura pertencente ao proprietário da residência. O servidor para onde serão enviados os dados coletados possuirá software destinado à apresentação e gerenciamento destas medições, de maneira a permitir que os pesquisadores possam acessar as informações fornecidas pelos medidores em interfaces gráficas, que permitam a geração de gráficos e tabelas.

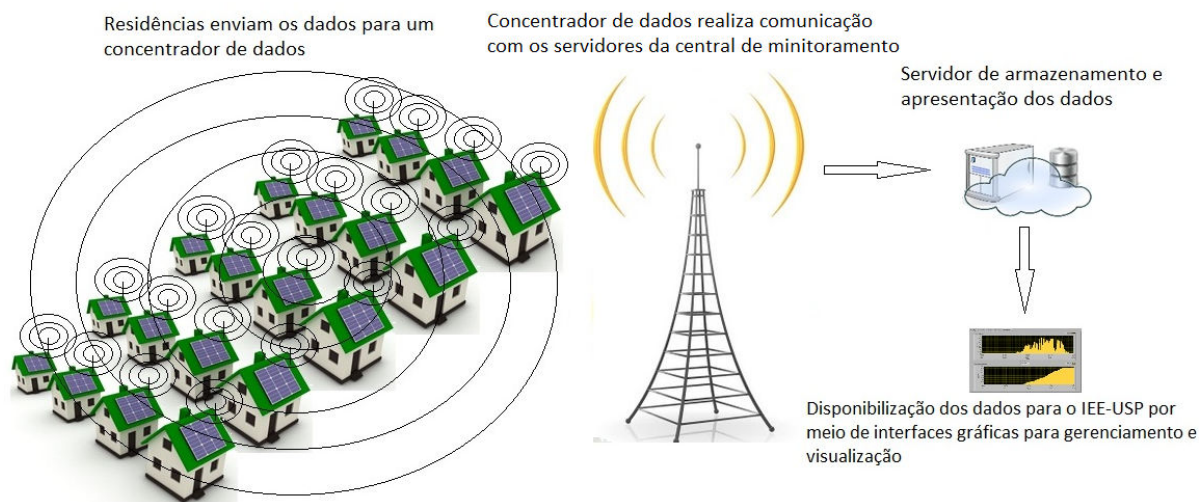


Figura 3. Acompanhamento remoto do desempenho do sistema.

4. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E ANÁLISE

A comparação e análise do desempenho entre diversos e diferentes sistemas fotovoltaicos podem ser realizadas mediante análise de um conjunto de índices, denominadas de índices de mérito técnico de sistemas fotovoltaicos. A análise do desempenho do sistema fotovoltaico baseia-se nos índices de mérito, utilizados pelo programa de avaliação energética da Comunidade Econômica Européia em seu programa de avaliação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede [CEC – Joint Research Centre, 1993 apud Oliveira, 2002]. Essa metodologia de análise necessita que a instalação fotovoltaica seja monitorada por um período mínimo de um ano para que sejam conhecidos os índices médios mensais e por consequência o desempenho energético do sistema fotovoltaico conectado à rede. As instalações fotovoltaicas conectadas à rede comumente incorporam um sistema de monitoramento experimental que tem a vantagem de retornar dados reais e confiáveis, mas implica na necessidade de equipamentos de medidas adequados e tempo para aquisição dos dados. Os índices de mérito técnico também podem ser obtidos mediante simulação computacional, que tem a vantagem de não requerer equipamentos e ensaios e tem uma rápida resposta dos resultados.

Em um sistema fotovoltaico a potência nominal do arranjo é definida como a potência no ponto de máxima potência na condição padrão (irradiância de 1000 W/m², temperatura de célula de 25 °C e distribuição espectral AM 1,5G). Os índices de mérito técnico de um sistema fotovoltaico representam índices de energia, eficiência, produtividade, desempenho e perdas.

A irradiância média diária no plano do arranjo fotovoltaico $[H(\gamma, \beta)]$ para o desvio azimutal (γ) e inclinação do arranjo (β) em relação ao plano horizontal é determinada por Eq. (1).

$$H(\gamma, \beta) = \frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} G dt \quad (1)$$

onde: G é a irradiância no plano do arranjo fotovoltaico, Γ é o período de operação do sistema.

A eficiência global do sistema é a razão entre a energia elétrica entregue à rede e a energia solar disponível para conversão no arranjo fotovoltaico [Eq.(2)].

$$\eta_s = \frac{E_{CA}}{E_{FV}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{CA} dt}{A_{FV} \int_{\Gamma} G dt} \quad (2)$$

onde: η_s é a eficiência global do sistema, E_{CA} é a energia elétrica entregue à rede, E_{FV} é a energia solar disponível para conversão no arranjo fotovoltaico, P_{CA} é a potência elétrica entregue à rede, A_{FV} é a área do arranjo fotovoltaico.

A eficiência do inversor é definida como a razão entre a energia elétrica em corrente contínua convertida pelo arranjo fotovoltaico e a energia elétrica em corrente alternada convertida pelo inversor [Eq. (3)].

$$\eta_{inv} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{CA} dt}{\int_{\Gamma} P_{CC} dt} \quad (3)$$

onde: η_{inv} é a eficiência de conversão do inversor, E_{CA} é a energia elétrica entregue à rede, E_{CC} é a energia elétrica na entrada do inversor, P_{CA} é a potência elétrica na saída do inversor, P_{CC} é a potência elétrica na entrada do inversor.

O Fator de Capacidade determinado pela Eq. (4) é definido pela razão entre a energia elétrica entregue à rede e a energia elétrica que seria entregue à rede se o sistema operasse 24 h por dia na potência do sistema em condição padrão (potência nominal).

$$FC = \frac{E_{CA}}{E_{STD}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{CA} dt}{\int_{\Gamma} P_{STD} dt} \quad (4)$$

onde: FC é o fator de capacidade do sistema, E_{CA} é a energia elétrica entregue à rede, E_{STD} é a energia elétrica que seria entregue à rede se o sistema operasse 24 h por dia na potência do sistema em condição padrão, P_{CA} é a potência elétrica entregue à rede, P_{STD} é a potência do sistema na condição padrão.

A produtividade é definida pela razão entre a energia elétrica convertida por cada kW_p instalado e pode ser determinada para o arranjo fotovoltaico e para o sistema fotovoltaico. O índice de produtividade indica o número de horas que o sistema deveria operar em sua potência em condição padrão para converter a mesma quantidade de energia convertida no período considerado. A produtividade do arranjo pode ser determinada pela Eq. (5). A produtividade do sistema pode ser determinada pela Eq. (6). A produtividade de referência é determinada pela Eq. (7).

$$Y_A = \frac{1}{P_{STD}} \left[\frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} P_{CC} dt \right] \quad (5)$$

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \left[\frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} P_{CA} dt \right] \quad (6)$$

$$Y_R = \frac{H(\gamma, \beta)}{G_{STD}} \quad (7)$$

O desempenho global do sistema, índice comumente utilizado para avaliação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, é definido pela razão entre a produtividade do sistema e a produtividade de referência [Eq. (8)].

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (8)$$

As perdas de captura do arranjo podem ser determinadas pela Eq. (9). As perdas do sistema podem ser determinadas pela Eq. (10).

$$L_C = Y_R - Y_A \quad (9)$$

$$L_S = Y_A - Y_F \quad (10)$$

A energia solar convertida em energia elétrica por um sistema fotovoltaico ao longo de um período determinado é estimada pela Eq. (11).

$$E_{CON} = \int_{\Gamma} \left(\frac{H(\gamma, \beta) PR}{G_{STD}} \right) P_{STD} \quad (11)$$

Entre os índices de mérito técnico, dois são comumente utilizados para comparação entre sistemas localizados em diferentes latitudes, Y_F e PR.

5. RESULTADOS PRELIMINARES

A resolução normativa nº 482 de 17 de abril de 2012 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. A microgeração distribuída é definida como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e a minigeração distribuída é definida como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW. Ambas são definidas para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. O sistema de compensação de energia elétrica é o sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa. As distribuidoras deveriam adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso de microgeração e minigeração distribuída, utilizando como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais (ANEEL, 2012).

Algumas características desta resolução merecem serem destacadas, pois se aplicam ao projeto descrito neste trabalho. O consumo a ser faturado, referente à energia elétrica ativa, será a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto horário, quando for o caso, devendo a distribuidora utilizar o excedente que não tenha sido compensado no ciclo de faturamento corrente para abater o consumo medido em meses subsequentes. Caso a energia ativa injetada em um determinado posto horário seja superior à energia ativa consumida, a diferença deverá ser utilizada, preferencialmente, para compensação em outros postos horários dentro do mesmo ciclo de faturamento, devendo, ainda, ser observada a relação entre os valores das tarifas de energia, se houver. Os créditos de energia ativa gerada por meio do sistema de compensação de energia elétrica expirarão 36 (trinta e seis) meses após a data do faturamento, não fazendo jus o consumidor a qualquer forma de compensação após o seu vencimento, e serão revertidos em prol da modicidade tarifária (ANEEL, 2012).

Os telhados fotovoltaicos em Porto Alegre/RS serão conectados à rede elétrica de distribuição da concessionária CEEE-D e, portanto devem estar de acordo com os procedimentos de distribuição da mesma. A norma NTD-00.081 emitida em 17/12/2012 estabelece as diretrizes básicas para a conexão e acesso de micro e minigeração, que operem com paralelismo permanente de geradores do consumidor, com fontes renováveis ou cogeração qualificada, conectados ao sistema de distribuição.

Todos os consumidores estabelecidos na área de concessão da CEEE-D, alimentados em média tensão ou baixa tensão devem comunicar a intenção de conexão de geradores de energia com fontes renováveis em paralelo com a rede da distribuidora através da apresentação de informações estabelecidas pela norma NTD-00.081. Mediante a análise das informações apresentadas, vistoria das instalações e aprovação da CEEE-D os consumidores são cadastrados no sistema de compensação de energia elétrica que é o sistema de redução do montante de energia elétrica consumida, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, pelo qual as unidades consumidoras participantes podem manter geradores conectados na rede de distribuição da CEEE-D, e injetar energia elétrica. O nível de tensão para conexão do módulo de geração da unidade consumidora é definido pela distribuidora de energia elétrica. É necessária a substituição do medidor de energia convencional por um medidor de energia eletrônico bidirecional (CEEE-D, 2012).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A regulação do setor elétrico desempenha o importante papel de orientar a evolução das energias em função das necessidades energéticas do país, incentivando sua produção em função do grau de desenvolvimento e interesse da mesma. Para que a energia solar fotovoltaica assuma o papel de vetor de desenvolvimento tecnológico e industrial, é primordial desenvolver iniciativas que permitam uma análise sistemática da inserção dessa fonte na matriz elétrica nacional. O atual processo de regulamentação elimina uma das maiores barreiras ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no Brasil.

Este trabalho apresentou a descrição e as características do projeto de 120 telhados fotovoltaicos no Brasil que serão instalados em seis cidades de diferentes regiões do país. Em especial o trabalho descreveu características do projeto de 20 telhados fotovoltaicos a serem instalados na cidade de Porto Alegre no sul do Brasil destacando os requisitos e condições exigidas pela concessionária de energia elétrica proprietária da rede elétrica onde os sistemas fotovoltaicos serão instalados. O trabalho também apresentou uma metodologia para monitoramento e análise do desempenho energético de sistemas fotovoltaicos integrados em edificações.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos).

REFERÊNCIAS

- ABINEE, Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (2012). Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2014). Informações Técnicas: Banco de informação de Geração.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2012). Resolução Normativa nº482.
- CEEE-D, Companhia Estadual de Energia Elétrica do Estado do Rio Grande do Sul. (2012). Procedimentos de Distribuição: Acesso de Mini e Microgeração com Fontes Renováveis e Cogeração Qualificada ao Sistema de Distribuição.
- COGEN, Associação da Indústria de Cogeração de Energia (2012). Inserção da Energia Solar no Brasil. GT COGEN SOLAR, Relatório Final, São Paulo.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética (2013). Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética (2012). Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Nota Técnica da EPE, Rio de Janeiro.
- EPIA, European Industry Association (2014). Market Report 2013. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.epia.org/news/publications/>.
- IEA-PVPS, International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. (2013) PVPS Report A Snapshot of Global PV 1992-2012. Preliminary Information from the IEA PVPS Programme.
- Krenzinger, A; Zilles, R. (2012). Fotovoltaica em Brasil: Potencial, Mercado y Políticas Públicas. XV Congresso Ibérico y X Congresso Iberoamericano de Energia Solar. Vigo, Galicia, Espanha.
- Oliveira, S. H. F. Geração Distribuída de Eletricidade: Inserções de Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, PIPGE/USP, São Paulo, Brasil. 2002.
- Zilles, R. (2013). Avanços e Desafios para a Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. III Workshop Inovação para o Fortalecimento do Setor de Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. São Paulo.

DISTRIBUTED GENERATION WITH BUILDINGS INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: METHODOLOGY FOR ANALYSIS OF THE ENERGY PERFORMANCE

Abstract. *The regulation of the electricity sector has the important role of guiding the investments in different sources of energy as function of the country needs. Such regulation has also the power of stimulating national market for different areas, such as the photovoltaic solar energy. In order to developed this clean and, considered as infinity, source of energy like what have been happening in countries such as USA, China and Germany, it is paramount to implement initiatives that allow a fair competition between the photovoltaic and the very well consolidated hydroelectric energy. Take into account vantages as the decentralized generation corresponds to an important act in order to promote the dissemination of the photovoltaic solar energy in Brazil. This work presents a methodology for analysis of the energetic performance of decentralized generation by build integrated photovoltaic systems in the context of the “120 roofs” national project*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Distributed Generation, Build Integrated Photovoltaic Systems*