

ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Danielle Goulart Peraza – danielleperaza@yahoo.com.br

Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, Setor de Auditoria Técnica

Fabiano Perin Gasparin – gasparin.fabiano@gmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

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

Resumo: *O presente trabalho faz parte de estudos que estão sendo realizados no projeto de P&D Estratégico ANEEL chamada n.º 013/2011, comandado pela CEEE-GT e intitulado Inserção da Geração Solar Fotovoltaica Urbana Conectada à Rede em Porto Alegre. A utilização de energia solar fotovoltaica é amplamente difundida no mundo e possui caráter promissor no Brasil atualmente. Apesar do grande potencial brasileiro, esta fonte de energia ainda apresenta baixos níveis de utilização. A competitividade da geração fotovoltaica de grande porte em usinas solares fotovoltaicas ainda não atingiu patamares admissíveis com taxas de retorno financeiro atrativas ao mercado nacional. Por se tratar de uma fonte de energia renovável, sua utilização no cenário mundial tem apresentado crescimento nos últimos anos. Mesmo em países que apresentam potenciais solares inferiores aos do Brasil, esta fonte de energia tem se mostrado competitiva devido aos incentivos oferecidos. Tendo em vista este prisma, o presente trabalho busca apresentar possibilidades de inserção de usinas solares fotovoltaicas no Estado do Rio Grande do Sul. A usina proposta possui capacidade de geração de 30 MWp. Este estudo visa apresentar uma proposta de diversificar a geração de energia elétrica no estado do Rio Grande do Sul, apresentado uma nova alternativa de geração de energia renovável. Para tal realização, foram estudadas as linhas de transmissão e subestações existentes no estado do Rio Grande do Sul como forma de avaliar a possibilidade de conexão direta da nova usina, tendo como objetivo a redução do custo de instalação. Foi realizado o cálculo da produtividade final fotovoltaica para o estado do Rio Grande do Sul e a análise dos custos de instalação desta fonte no Estado, bem como os limites de preços para geração fotovoltaica centralizada no estado.*

Palavras chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Usina, Linha de Transmissão, Subestação.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de uma sociedade está diretamente relacionado ao consumo de energia, sendo assim, encontrar mecanismos que propiciem a viabilidade econômica de fontes renováveis é fundamental para o desenvolvimento da sociedade moderna. A busca atual por soluções energéticas sustentáveis em função dos efeitos nocivos das emissões de gases de efeito estufa e do esgotamento dos combustíveis fósseis se tornou uma demanda universal.

Os investimentos em energia renovável não convencional ocorrem em menor escala no Brasil diferentemente dos pesados investimentos realizados ao redor do mundo buscando acelerar a transição entre o atual modelo e um novo modelo baseado em baixas emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, os investimentos e as políticas de incentivo ainda são tímidos tornando o cenário menos promissor para fontes alternativas de energias renováveis. A matriz energética brasileira é predominantemente hidrelétrica, e embora sendo uma energia limpa, há a geração de consideráveis impactos ambientais devido à necessidade de formação de grandes reservatórios para garantir a geração de energia. Esta matriz é complementada por usinas termoeletricas, nucleares, eólicas e de biomassa.

A predominância de apenas uma fonte energética como a hídrica na matriz energética nacional pode acarretar em diminuição das garantias de abastecimento, pois a geração fica sujeita a efeitos climáticos desfavoráveis como a estiagem. Os analistas de planejamento concordam que certo grau de diversificação de fontes é muito importante. O aumento da utilização da energia eólica contribui neste sentido, assim como a utilização da energia solar fotovoltaica.

Atualmente, a matriz energética do estado do Rio Grande do Sul não contempla a geração solar. Tendo em vista a possibilidade de instalação futura de usinas solares fotovoltaicas foi realizado um estudo contendo a análise do potencial solar e possibilidades de conexão da usina ao sistema elétrico, considerando a posição das subestações e das linhas de transmissão de 230 kV presentes no estado. Foi também revista uma metodologia para calcular a produtividade fotovoltaica considerando as diversas variáveis que compõem a conversão da energia solar em energia elétrica injetada na rede. A partir destes dados é possível estimar o custo de instalação de uma usina solar fotovoltaica e o preço de venda da energia gerada para as diversas regiões do estado.

2. PRODUTIVIDADE FINAL FOTOVOLTAICA

2.1 Potência injetada na rede.

Para fins de cálculo da conversão da energia solar em energia elétrica foram selecionados componentes com características típicas. O módulo selecionado foi o Yingli modelo YL 245P-29b, por se tratar de um típico módulo policristalino produzido atualmente. O inversor selecionado foi da marca Ingeteam, sendo utilizada uma curva de eficiência de um modelo típico utilizado em instalações de grande potência, tecnologia sem transformador, além de estar de acordo com a IEC 62109 (2010). Estes componentes apresentam as características típicas dos equipamentos disponíveis no mercado para esta aplicação, apresentando qualidade e confiabilidade adequada às instalações fotovoltaicas de grande porte.

O programa utilizado para esta aplicação foi o código do RADIASOL2, desenvolvido no LABSOL – Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Este programa foi utilizado para calcular os valores de irradiação diária sobre uma superfície inclinada, partindo do valor de irradiação diária em média mensal sobre uma superfície horizontal. O programa fonte foi modificado para produzir informações, a cada hora ao longo de um ano, sobre a conversão de energia solar em elétrica, a partir dos valores de radiação solar diária e média mensal. A conversão de energia solar em energia elétrica foi realizada a partir da Eq. (1), a qual foi adaptada de Almeida (2012).

$$P_{INJ} = P_{STD} \left[\frac{I_{bT} F_{\theta} + I_{dT}}{1000} \right] F_G F_T F_{ASS} F_{FIO} \eta_{CC/CA} \eta_{SPMP} \eta_{TRAFO} \quad (1)$$

onde:

P_{INJ} = potência elétrica injetada na rede, em média na hora considerada;

P_{STD} = potência nominal do arranjo fotovoltaico (nas condições padronizadas);

I_{bT} = irradiância direta média sobre superfície inclinada na hora considerada, em W/m²;

I_{dT} = irradiância difusa média sobre superfície inclinada na hora considerada, incluindo a irradiância refletida pelo solo;

F_{θ} = fator de correção da variação da potência em função do ângulo de incidência da radiação solar direta;

F_G = fator de correção da variação da eficiência exclusivamente em função do fluxo de radiação solar incidente;

F_T = fator de correção da variação da potência exclusivamente em função da temperatura da célula

F_{ASS} = fator de correção da potência em função das perdas por associação de módulos

F_{FIO} = fator associado às perdas relativas às resistências elétricas dos cabos.

$\eta_{CC/CA}$ = eficiência de conversão do inversor

η_{SPMP} = eficiência do seguidor do ponto de máxima potência do inversor

η_{TRAFO} = eficiência do transformador de baixa para média tensão

Vários dos termos referidos na Eq.(1) tem sua forma de determinação descrita a seguir.

Fator de correção com o ângulo. O fator de correção da variação da potência exclusivamente em função do ângulo de incidência da radiação solar direta (F_{θ}) é dado pela relação entre a refletividade de apenas uma interface do vidro no ângulo de incidência da radiação direta e a refletividade do vidro com incidência normal. Este cálculo é realizado com as equações de reflexão que podem ser encontradas em textos como Duffie e Beckman (1991).

Fator de correção com o fluxo de radiação. O fator de correção da variação da eficiência da conversão fotovoltaica exclusivamente em função do fluxo de radiação solar incidente; (F_G) deve ser usado para corrigir a não-linearidade da potência produzida por um módulo fotovoltaico com a irradiância solar. Com uso do software CREARRAY (LABSOL) e com os dados do módulo fotovoltaico selecionado, foi feito um estudo da variação da potência exclusivamente com a irradiância solar, uma vez que esta relação não é linear para baixas irradiâncias, resultando em uma equação para correção da potência em função da irradiância, conforme Eq. (2) e Eq.(3).

$$G = I_{bT} F_{\theta} + I_{dT} \quad (2)$$

$$F_G = \frac{\frac{G}{G_{STC}}}{\frac{G}{G_{STC}} + \left(n_0 + n_1 \frac{G}{G_{STC}} + n_2 \left(\frac{G}{G_{STC}} \right)^2 \right)} \quad (3)$$

onde os coeficientes $n_0 = 0,002107$; $n_1 = -0,01045126$ e $n_2 = 0,001$ foram determinados com os resultados obtidos através do programa CREARRAY, através da simulação do comportamento do módulo Yingli modelo YL 245P-29b quando exposto a diversos valores de irradiância solar. Foi obtida uma curva a partir dos valores de potência obtidos do módulo em função da irradiância e os coeficientes n_0 , n_1 e n_2 foram determinados pelo ajuste da curva obtida com a Eq. 3.

Fator de correção em função da temperatura. O fator de correção da variação da potência exclusivamente em função da temperatura da célula (F_T) pode ser obtido da Eq. (4). Segundo o fabricante do módulo, o coeficiente de variação da potência com a temperatura é 0,45%/°C.

$$F_T = 1 - 0,0045[T_C - 25^\circ] \quad (4)$$

onde T_C é a temperatura da célula, calculada para cada hora em função da temperatura ambiente e da irradiância solar. A temperatura ambiente é dada pelo software Radiasol2. Krenzinger (1987) demonstrou que, para baixas velocidades de vento, a temperatura das células é proporcional à irradiância recebida pelo módulo. Associando esta informação com a definição da temperatura nominal de operação da célula (T_{NOC}) obtém-se a Eq.(5), que foi utilizada.

$$T_c = T_{amb} + \left[\frac{T_{NOC} - 20^\circ C}{800 W m^{-2}} \right] [I_{bT} F_\theta + I_{dT}] \quad (5)$$

onde T_{amb} é a temperatura ambiente e $T_{NOC} = 46^\circ C$, segundo o catálogo do fabricante do módulo;

Fator de correção devido a perdas por associação. O fator de correção da potência em função das perdas por associação de módulos (F_{ASS}). foi considerado constante com valor de 0,98. Uma perda de 2% pelo fato dos módulos não serem exatamente iguais é considerado padrão em sistemas de grande porte (PVSYST, 2013);

Fator de correção pelas resistências nos fios. O fator associado às perdas relativas às resistências elétricas dos cabos (F_{FIO}) considera todas as conexões tanto no arranjo fotovoltaico como no lado CA. Como as perdas por efeito Joule são proporcionais ao quadrado da intensidade de corrente, foi utilizada a Eq. (6) que confere uma perda de 3% na condição de potência nominal, valor proposto em PVSYST (2013);

$$F_{Fio} = 1 - 0,03 \left[\frac{I_{bT} F_\theta + I_{dT}}{1000 W m^{-2}} F_G F_T F_{ASS} \right]^2 \quad (6)$$

Eficiência de conversão do inversor. Segundo Rampinelli (2010) a estimativa da eficiência de conversão de um inversor ($\eta_{CC/CA}$) se dá em função do seu carregamento com parâmetros dependentes da tensão de utilização, conforme a Eq. (8). Antes, a Eq. (7) define a potência relativa P_R , considerando que P_{CA} é a potência de saída do inversor e P_N é a potência nominal.

$$P_R = \frac{P_{CA}}{P_N} \quad (7)$$

$$\eta_{CC/CA} = \frac{P_R}{P_R + (k_0(V_{CC}) + k_1(V_{CC})P_R + k_2(V_{CC})(P_R)^2)} \quad (8)$$

onde k_0 , k_1 e k_2 são parâmetros dependentes da tensão de saída do arranjo fotovoltaico, conforme Rampinelli (2010). Para a aplicação referida neste trabalho, os parâmetros foram obtidos por ajuste da curva de eficiência de um inversor típico utilizado nas instalações fotovoltaicas de grande porte, obtendo-se os seguintes valores: $k_0 = 0,001055$; $k_1 = 0,008783$; $k_2 = 0,005837$;

Para poder utilizar a Eq. (8) é necessário decidir sobre P_R para cada hora e para isto foi feita uma estimativa de P_{CA} usando a Eq. (9), com eficiência média prévia de 0,98, e um fator de dimensionamento do inversor de 0,9, isto é, considerando uma potência da instalação de 1kWp como P_{STD} a P_N do inversor é 900 W.

$$P_{CA} = 0,98 P_{STD} \left[\frac{I_{bT} F_\theta + I_{dT}}{1000} \right] F_G F_T F_{ASS} F_{Fio} \quad (9)$$

Eficiência do seguidor do ponto de máxima potência A eficiência η_{SPMP} também pode variar com a potência relativa, mas seus valores são tão próximos à unidade e uniformes que decidiu-se simplificar utilizando um valor constante $\eta_{SPMP} = 0,99$.

Eficiência do transformador. O inversor selecionado tem alta eficiência e opera sem transformador. Para levar a energia até a subestação é necessário utilizar um transformador de baixa para média tensão. η_{TRAFO} consiste na eficiência deste transformador que depende de seu carregamento. A partir da Fig.1, que apresenta a curva de eficiência para transformadores de 300 kVA, foram ajustados os parâmetros para a Eq. (10).

$$\eta_{TRAFO} = 0,9365 + 0,3156 P_R - 0,7007 P_R^2 + 0,638121 P_R^3 - 0,207087 P_R^4 \quad (10)$$

A Fig. 1 apresenta o comportamento típico das eficiências pelas perdas nos condutores F_{FIO} , do transformador η_{TRAFO} e do inversor $\eta_{CC/CA}$ em função da potência relativa. Os dados para a curva de eficiência do transformador η_{TRAFO} foram obtidos a partir de Cardoso (2005).

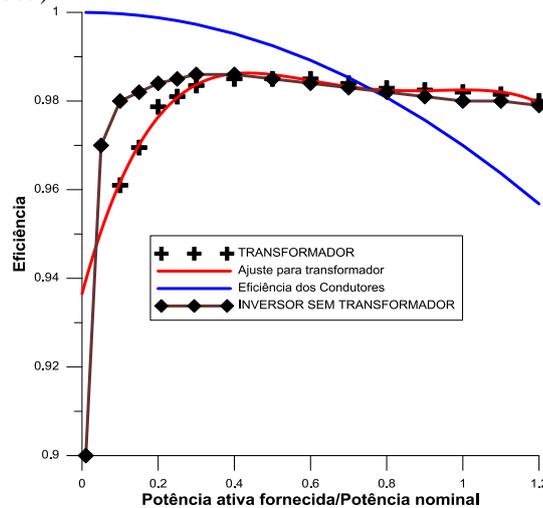


Figura 1- Curvas das eficiências pelas perdas nos condutores F_{FIO} , do transformador η_{TRAFO} e do inversor $\eta_{CC/CA}$ em função da potência relativa.

2.2 Energia injetada na rede e produtividade final.

A energia elétrica produzida em um ano é dada pela Eq. (11).

$$E_R = \sum_{m=1}^{12} \sum_{n=1}^{ndm} \sum_{h=1}^{24} P_{INJ} \quad (11)$$

onde E_R = energia produzida; ndm = número de dias do mês, e n, m e h se referem a meses, dias e horas, lembrando que a potência injetada representa a média horária.

A produtividade final Y_F é definida como a energia elétrica anual injetada na rede por unidade de potência nominal do gerador fotovoltaico conforme Eq. (12).

$$Y_F = \frac{E_R}{P_{NG}} \quad (12)$$

A partir dos dados calculados para a produtividade fotovoltaica foi gerado o gráfico apresentado na Fig. 2, que mostra esta grandeza para o estado do Rio Grande do Sul expressa em kWh/kW_p-ano.

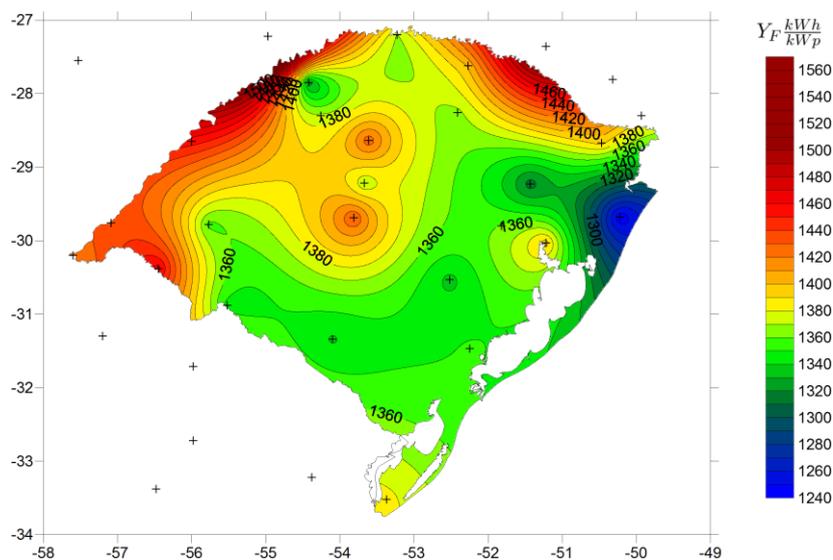


Figura 2 – Produtividade fotovoltaica Y_F (kWh/kW_p-ano).

A partir da análise da Fig. 2 é possível verificar que as regiões nordeste e principalmente noroeste do estado do Rio Grande do Sul apresentam maior produtividade fotovoltaica que as demais regiões do estado. Cabe salientar que a

produtividade fotovoltaica está diretamente relacionada à região de instalação da usina fotovoltaica, pois neste caso somente a radiação solar incidente e as temperaturas são variáveis, uma vez que o arranjo foi considerado padrão para todos os locais estudados. É possível concluir que a produtividade fotovoltaica típica do estado do Rio Grande do Sul está na faixa de 1380 kWh/kWp ano apresentado um fator de capacidade de 15,7 %.

2.2. CONEXÃO AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Define-se por linha de transmissão o conjunto de condutores, isoladores, estruturas e acessórios, utilizado para o transporte da energia elétrica entre as subestações (elevadora, abaixadora e de transmissão) e que operam com tensões iguais ou superiores a 69 kV. Define-se por subestação um conjunto de equipamentos de manobra e ou transformação e ainda eventualmente de compensação de reativos usado para dirigir o fluxo de energia em sistema de potência e possibilitar a sua diversificação através de rotas alternativas, possuindo dispositivos de proteção capazes de detectar os diferentes tipos de falhas que ocorrem no sistema e de isolar os trechos onde estas falhas ocorrem.

Neste trabalho serão abordadas as subestações que comportam a inserção da carga proposta e linhas de transmissão que operam em 230 kV. A metodologia utilizada para determinação do custo de linha de transmissão e subestação necessárias à conexão da usina solar ao sistema integrado nacional foi realizada com base no banco de preços ANEEL, conforme Resolução Homologatória N° 758, de 6 de janeiro de 2009, conforme Anexo IV. Para obtenção do custo médio por km da linha de transmissão necessária à conexão da usina solar ao sistema integrado foi realizado o estudo das linhas de transmissão que operam em 230 kV no estado do Rio Grande do Sul. A tensão de operação foi determinada em função da conexão da usina solar ocorrer em nível de transmissão.

A partir das características climáticas do Estado do Rio Grande do Sul e das características das linhas de transmissão instaladas no estado optamos por utilizar uma linha de transmissão 230 kV do tipo auto portante, em circuito simples, com fundações do tipo grelha utilizando condutor 636,0 MCM com 321,84 mm² de área da seção transversal, do tipo Grosbeak. Os cabos pararraios são de 9,15 mm de aço 3/8 a dois condutores. O custo médio de 1 km de linha de transmissão na presente especificação para a região sul é de R\$ 301.383,49 conforme estabelece a Resolução Homologatória N° 758, de 6 de janeiro de 2009.

Para a obtenção do custo médio da subestação necessária à conexão da usina solar foram considerados os seguintes parâmetros:

- Tensão de Operação: 230 kV;
- Potência da instalação: 30 MVA;
- Entrada de Linha 230 kV;
- Conexão de transformador;
- Transformador;

A Fig. 3 apresenta mapa contendo o custo de instalação de linhas de transmissão em 230 kV para uma usina fotovoltaica de 30 MW_p e subestação necessária à conexão da usina solar fotovoltaica com o sistema interligado nacional – SIN.

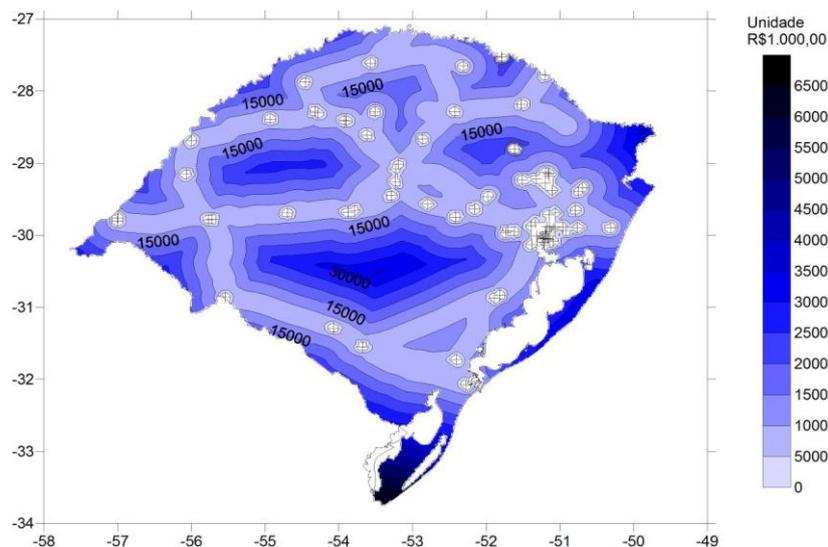


Figura 3 - Custo de linha de transmissão em 230 kV para instalação de Usina Fotovoltaica de 30 MW_p, incluindo Subestação.

O custo médio para região sul de subestação de 50 MVA é de R\$ 9.131.822,76, conforme estabelecido na Resolução Homologatória N° 758, de 6 de janeiro de 2009. Porém não há no banco de preços ANEEL valor de referência para transformador de 30 MVA para a tensão correspondente. Como forma de apresentar um custo coerente foi utilizado um fator redutor na proporção 3/5 buscando aproximar o custo médio ao mercado, desta forma o custo da

subestação foi estimado em R\$ 5.479.100,00. Para realização deste estudo foram selecionadas subestações com capacidade de carga compatível com o acesso de uma nova usina e que são representadas no mapa. Próximo a estas subestações o custo de instalação da usina é significativamente menor, uma vez que não será necessário agregar custos de construção de linhas de transmissão e subestação para a conexão da usina no sistema interligado nacional – SIN.

3. RESULTADOS

O resultado obtido foi o mapeamento do preço da energia solar fotovoltaica, considerando o custo de interligação da usina solar fotovoltaica com o sistema interligado nacional – SIN, através de subestação e linha de transmissão. A taxa interna de retorno considerada foi de 7,5 %.

Para realização do cálculo do preço da energia foram considerados os parâmetros econômicos (taxas, impostos e taxa interna de retorno) apresentados em ABINEE, (2012). Segundo este estudo, o custo nacionalizado dos inversores e painéis fotovoltaicos é de 3,87 R\$/W. Para a realização desta estimativa de custos a ABINEE aplicou os seguintes tributos:

- Incidência de imposto de importação (II) sobre módulos igual a 12% e inversores importados (14%);
- A alíquota do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) incidente sobre módulos fotovoltaicos continua sendo de 0%, conforme Tabela de Incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados (TIPI) anexa ao Decreto nº 7.660, de 23/12/2011. Há, entretanto, incidência de alíquota de IPI de 15% sobre os inversores importados. Os inversores nacionais recebem redução no IPI, como parte dos incentivos da Lei da Informática, que pode chegar a 100% sob alguns condicionantes;
- Incidência de ICMS sobre inversores para o estado do Rio Grande do Sul considerada 17% ;
- Incidência de PIS (1,65%) e COFINS (7,6%);
- Utilização de valores representativos de serviços aduaneiros;
- Aquisição de projetos e demais componentes nacionais (estrutura de fixação de módulos, disjuntores, cabos etc.).

Conforme descrito em ABINEE (2012), o preço de mercado descrito pela publicação PHOTON Internacional indica que o preço médio do módulo fotovoltaico de origem asiática vendido na Alemanha rompeu a barreira de 1 €/Watt, segundo uma amostra de 7.153 modelos, havendo uma dispersão de valores em torno do valor médio 0,98 €/W_p, com módulos variando entre 0,70 e 1,25 €/W_p. No entanto um levantamento mais atual, incluindo 2013 (PV-Magazine, 2013), mostra que houve uma certa estabilização em torno de 0,6 €/W_p, conforme Fig. 4. Ocorre que o Real desvalorizou entre 2012 e 2013, portanto os valores em reais dados pela ABINEE de certa forma ainda são válidos.

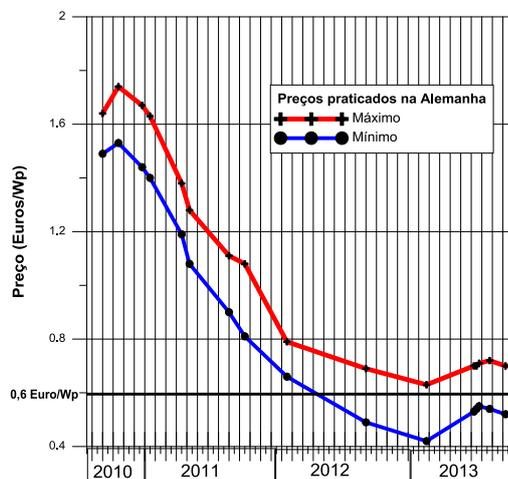


Figura 4 – Tendência de preços de módulos chineses praticados na Alemanha. Fonte: PV-Magazine (2013)

Também para os inversores, conforme descrito em ABINEE (2012) a amostra levantada pela PHOTON Internacional, realizada com 1.301 modelos utilizados no mercado alemão contendo o preço dos inversores, apresenta uma variação entre 0,11 €/W_p e 0,24 €/W_p. Cabe ressaltar que os preços para inversores com potência acima de 10 kW, estão na faixa de 0,19 €/W_p

Os demais itens de custo que compõem sistemas fotovoltaicos são relacionados a equipamentos e serviços. Estes custos estão diretamente relacionados às condições específicas de cada instalação. Os equipamentos podem ser descritos como estruturas metálicas para fixação dos módulos, cabos, disjuntores, quadros elétricos. Os serviços podem ser descritos como o projeto básico e executivo de engenharia, autorização na ANEEL, licenciamento e instalação do projeto. O estudo apresentado na Nota técnica EPE (2012) referente ao preço da energia estimado para uma usina solar fotovoltaica está na ordem de 400 R\$/MWh, considerando valor fixado de instalação em 5.200R\$/kW_p.

Conforme Resolução Normativa da ANEEL nº 481, de 17/04/2012, a TUSD - tarifa de uso do sistema de distribuição e a TUST – tarifa de uso do sistema de transmissão possuem redução de 80% nos 10 primeiros anos e de 50% após este período, sendo assim a potência da instalação foi fixada em 30 MW_p em função dos incentivos descritos.

Para este trabalho os custos considerados estão apresentados na Tab. 1. A usina solar proposta possui 30 MW_p, o preço FOB dos módulos e inversores utilizados para este estudo são respectivamente 0,6 e 0,15 €/W_p, considerando uma taxa de câmbio de 3,00R\$/€. Os demais custos foram estimados a partir dos estudos publicados pela ABINEE.

A partir dos resultados apresentado em ABINEE (2012), verifica-se, para a opção de TIR=7,5% aa, uma progressão linear de custo de energia em função do investimento, para um fator de capacidade de 18,5%. Evidentemente para lugares com irradiação diferente esta aproximação não válida diretamente, mas é seguro considerar uma aproximação inversamente proporcional entre o preço e a produção de energia. Como para o Estado do Rio Grande do Sul o fator de capacidade foi considerado em função da localização, esta proporção inversa foi considerada. A partir da regressão linear do custo de energia, apresentada na Fig. 5, foi gerada a equação da reta correspondente, a qual foi adaptada para o cálculo do preço de venda de energia considerando TIR de 7,5%, conforme apresentado na Eq. (13).

Tabela 1 - Custo do empreendimento - R\$/W_p, vida útil do projeto 25 anos e substituição dos inversores em 12,5 anos.

	Custo do * Investimento (R\$)	Custo do ** Investimento (R\$)
Custo de módulos fotovoltaicos e Inversores	99.600.000,00	126.670.000,00
Custo de cabos e proteções	13.100.000,00	13.100.000,00
Custo dos sistemas de fixação	14.000.000,00	14.000.000,00
Demais custos (projetos, conexão, terreno etc.)	18.000.000,00	18.000.000,00
Total	144.700.000,00	171.770.000,00
Custo Total Normaliza (R\$/Wp)	4,82	5,73

* Não considera a substituição dos inversores
 ** Considera a substituição dos inversores depois de 12,5 anos

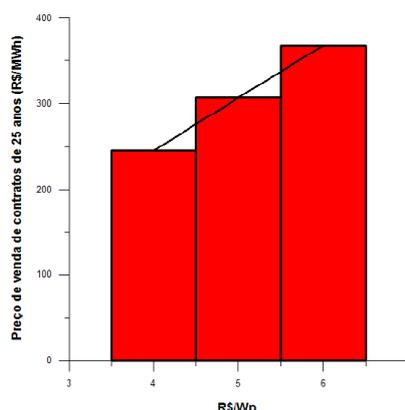


Figura 5 – Preço de venda de energia em função do investimento *i*.
 Fonte: elaborado a partir dos dados de ABINEE (2012) para TIR de 7,5%

$$P = [a - b * Y_F] * i \quad (13)$$

onde:

P = preço da energia (R\$/MWh)

a é o coeficiente angular da reta de regressão com valor de 143 para TIR de 7,5%

b é o coeficiente linear da reta de regressão com valor de 0,054 para TIR de 7,5%

i é o investimento total expresso em R\$/W_p

Y_F = Produtividade fotovoltaica anual, em kWh/kWp/ano

O resultado dos cálculos utilizando da Eq. (13) e considerando para o investimento *i* a soma do valor da Tab. 1, 5,73 R\$/Wp com o custo das linhas de transmissão e subestações obtidos da Fig. 3 e depois normalizados foram inseridos no programa Surfer gerando um gráfico da distribuição do preço de venda da energia produzida no Estado do Rio Grande do Sul em função da posição geográfica da usina, para uma taxa de retorno de 7,5% aa.

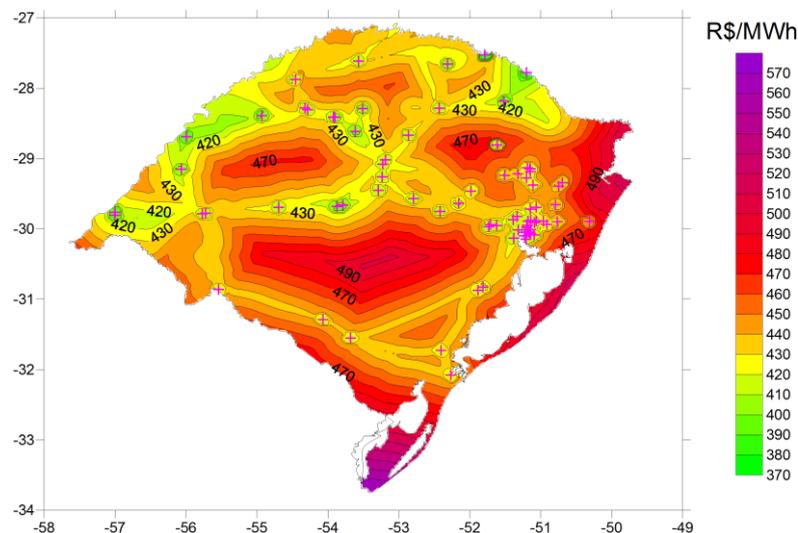


Figura 6 - Preço da energia elétrica produzida por usinas fotovoltaicas de 30 MW_p no Rio Grande do Sul, incluindo custo das linhas de transmissão e subestações, para uma taxa interna de retorno de 7,5% aa.

A partir da análise do mapa é possível constatar que a os locais onde há possibilidade de utilização de subestação e linha de transmissão existentes possuem maior viabilidade econômica de instalação de uma usina solar fotovoltaica. Nestes locais, os preços praticados nos leilões de compra de energia estariam no patamar de 370 R\$/MWh. Verifica-se também que a região litorânea do estado e o extremo sul não se mostra promissora para a instalação da usina solar fotovoltaica considerada neste estudo. Os locais com maiores irradiações e próximos às subestações apresentariam o menor preço de venda da energia produzida, ou seja, principalmente no noroeste do estado, região central e região metropolitana de Porto Alegre.

O cenário apresentado é conservador do ponto de vista financeiro considerando taxa interna de retorno TIR de 7,5%, incidência de imposto de importação (II), imposto sobre produtos industrializados (IPI), imposto sobre produtos industrializados (TIPI), incidência de ICMS, PIS, COFINS, utilização de valores representativos de serviços aduaneiros. Como forma de estabelecer um preço limite para que a energia elétrica seja produzida por usinas fotovoltaicas foi realizada nova análise mantendo os índices de produtividade fotovoltaica para o estado do Rio Grande do Sul, e a relação R\$/W_p apresentada na Tabela 1. Este novo cenário considerou uma taxa interna de retorno TIR de 0%, não foram considerados os custos de linha de transmissão e subestação, as quais poderiam ser instaladas pelas concessionárias como incentivo. Para estudar o custo mínimo da oferta de energia elétrica gerada por usinas fotovoltaicas no estado do Rio Grande do Sul e a realização das análises financeiras deste empreendimento foi utilizada uma planilha financeira de fluxo de caixa onde os seguintes parâmetros foram fixados:

- Prazo de recuperação de investimento: 20 anos;
- Prazo de carência: 02 anos;
- Percentual de Financiamento: 80% do investimento total;
- Juros e taxas do financiamento a 2% ao ano;
- Seguro: 0,3% ao ano;
- Perda de eficiência nos módulos: 0,5% ao ano;
- Depreciação do inversor: 10 anos de operação;
- Custos de operação e manutenção: 1% ao ano (considerando o investimento total);
- Imposto de Renda: 25%;
- Taxa ANEEL: 0,5% ao ano ;
- Contribuição Social sobre Lucro Líquido: 9% ;
- Fator de Capacidade: variável ;
- Valor do investimento em R\$/W_p: variável;

Esta planilha financeira de fluxo de caixa foi testada com valores de investimento e taxa interna de retorno - TIR conforme as publicações citadas anteriormente e se mostrou muito coerente. Comprovou-se com o uso da planilha financeira de fluxo de caixa que a relação entre custo da energia e o valor do investimento é bastante linear no intervalo considerado. Esta, foi então utilizada para encontrar o custo da energia que remunera o investimento sem considerar lucro algum, isto é, para um resultado de taxa interna de retorno - TIR igual a zero.

Seguindo os dados apresentados pela planilha financeira e após simulações, foi gerada uma reta cuja equação foi utilizada para o cálculo do preço limite de venda de energia, aproveitando a mesma Eq. (13) apresentada anteriormente, mas agora com os coeficientes $a = 112,12$ e $b = 0,04168$. Os resultados dos cálculos obtidos neste novo cenário, utilizando valor de investimento de 4,82 R\$/W_p, foram inseridos no programa Surfer gerando um gráfico da distribuição do preço de venda da energia produzida no Estado do Rio Grande do Sul em função da posição geográfica da usina.

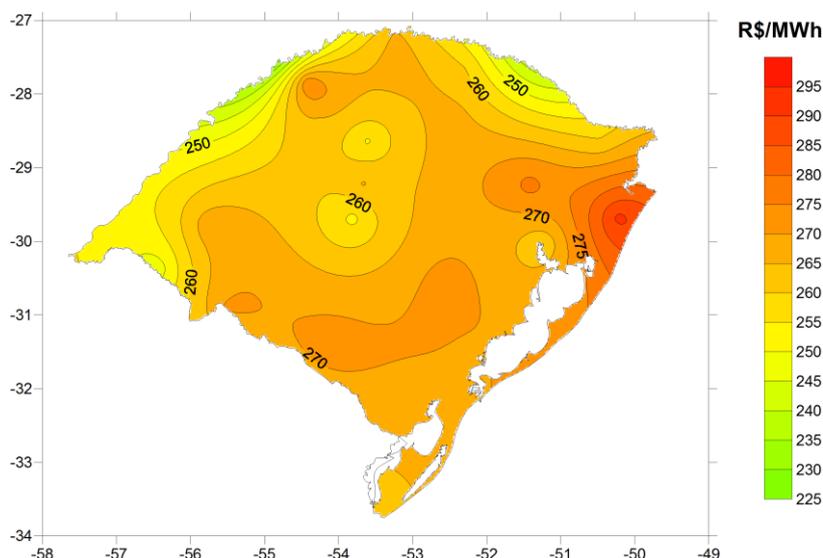


Figura 7-Preço limite da energia elétrica produzida por usinas fotovoltaicas para TIR=0%.

A partir da análise do mapa da Figura 7 é possível constatar que com incentivo fiscais e redução da taxa interna de retorno - TIR a inserção de usina Solar Fotovoltaica no estado do Rio Grande do Sul se aproxima da viabilidade.

O preço inicial praticado no leilão de compra de energia exclusivo para fonte solar no estado de Pernambuco foi de 250 R\$/MWh semelhante a estimativa de preço apresentada na Figura 7, salienta-se que a irradiação solar incidente no estado de Pernambuco é semelhante a irradiação solar incidente no estado do Rio Grande do Sul, sendo assim, os indicativos de viabilidade desta fonte no estado do Rio Grande do Sul se tornam mais latentes.

Atualmente, em função baixo nível dos reservatórios, e dos cumulativos recordes de demanda, o Preço de Liquidação das Diferenças – PLD da primeira semana de fevereiro de 2014, atingiu o limite máximo definido pela ANEEL para o ano de 2014, de 822,83 R\$/MWh, de acordo com dados da CCEE. O valor do PLD atual é muito superior ao preço médio apresentado para a instalação de uma usina Solar Fotovoltaica no estado do Rio Grande do Sul que é de 260 R\$/MWh. Os comparativos entre estes dois valores demonstram uma ampla margem de preço, porém é necessário considerar as variações sazonais dos preços praticados no PLD ao longo do ano.

O comparativo dos valores apresentados nos mapas de preço da energia elétrica produzida por usinas fotovoltaicas das Figuras 6 e 7, demonstra uma redução de 40% do preço da energia. Esta redução se dá basicamente em função de ajustes financeiros como taxas de juros, TIR, e redução de impostos, ambos os mapas foram produzidos com base nos mesmos dados de produtividade fotovoltaica. A redução apresentada demonstra indicativos de viabiliza de inserção de usina Solar Fotovoltaica no estado do Rio Grande do Sul.

4. CONCLUSÕES

A partir do estudo de viabilidade econômica da instalação de uma usina solar fotovoltaica no estado do Rio Grande do Sul é possível constatar que a utilização de conexão existente, linhas de transmissão e subestação é fator determinante para a viabilidade econômica. A radiação solar incidente no estado do Rio Grande do Sul é pouco variável considerando as diferentes regiões do estado. As diversas regiões possuem patamares de radiação solar que resultam na produtividade fotovoltaica variando de 1300 a 1500 kWh/kWp-ano.

A integração da geração fotovoltaica às demais fontes de energia exploradas no Estado do Rio Grande do Sul é impulsionada pelas tendências mundiais de produzir energia com fontes alternativas e principalmente para o caso brasileiro, como forma de diversificação da matriz energética. Os valores obtidos para o preço da energia produzida por uma usina solar fotovoltaica ainda são elevados quando comparados às fontes eólica e hídrica, mas os resultados do trabalho podem nortear a decisão da instalação de projetos e os pontos a serem trabalhados, além de guiar os investidores sobre as possibilidades atuais de inserção de usinas de grande porte no caso de incentivos.

A redução de preço estabelecida através da comparação dos preços demonstrados nas Figuras 6 e 7 evidencia a necessidade de políticas de incentivo e redução de impostos como forma de acelerar a viabilidade de inserção da fonte solar fotovoltaica no estado do Rio Grande do Sul.

Agradecimentos

A pesquisa que gerou os resultados deste trabalho fez parte do projeto de P&D Estratégico ANEEL chamada n.º 013/2011, comandado pela CEEE-GT e intitulado *Inserção da Geração Solar Fotovoltaica Urbana Conectada à Rede em Porto Alegre*. O trabalho foi realizado com apoio financeiro da Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica - CEEE-GT, da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica - CEEE-D e do Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPQ. O LABSOL é laboratório associado ao INCT-ERREA, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M., 2012 **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. São Paulo: Dissertação de Mestrado.
- ABINEE, 2012. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, Preparado por Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da ABINEE, Julho de 2012.
- Cardoso, P. M., 2005 **Adaptação de um Sistema de Medição de Gases Dissolvidos em Óleo Mineral Isolante para Monitoração de Múltiplos Transformadores de Potência**. *Dissertação de Mestrado*, UFSC/CT/PPGMCI – Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis, SC.
- EPE, 2012. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/>. Acesso em: Novembro 2012.
- IEC 62109, 2010. *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems*.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. “**Solar Engineering of Thermal Processes**”. John Wiley & Sons.
- EPIA. **Market Report 2012**. European Photovoltaic Industry Association. [S.l.]
- Krenzinger, A., 1987 **Contribución al Diseño de Sistemas Fotovoltaicos con Paneles Bifaciales en Combinación com reflectores Difusos de Carácter General**. Tese de Doutorado, Universidad Politécnica de Madrid, E. T. S. I. de Telecomunicación, Espanha.
- Krenzinger, A., 1998. “**RADIASOL - Programa para a determinação da radiação solar sob superfícies com diferentes ângulos de inclinação**”. Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Macagnan, M. H. 1989. “**Estudo de Modelos de Sintetização de Dados de Radiação Solar**”. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- PV-magazine, 201. Disponível em <http://www.pv-magazine.com/>. Acessado em Novembro de 2013.
- PVSYST(2013) “**Manual de Utilização do Software PVSYST 6**”, acessado através do link <http://files.pvsyst.com/help/index.html> em 23/08/2013.
- Rampinelli, G. **Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados á Rede**. Porto Alegre: Tese de Doutorado, 2010.

VIABILITY ASSESSMENT OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT INSTALLATION IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL

Abstract. *This work is part of studies being carried out in the Strategic R & D project called ANEEL n ° 013/2011, headed by CEEE - GT and entitled "Insertion of Grid-connected Photovoltaic Urban Generation in Porto Alegre. The use of photovoltaic solar energy is widespread in the world and has promising character in Brazil today. Despite the large Brazilian potential, this energy source still shows low levels of utilization. The competitiveness of large photovoltaic generation has not yet reached acceptable levels with attractive rates of financial return to the national market. Because it is a renewable source of energy, its use on the world stage has been increasing in recent years. Even in countries with potential lower than in Brazil, this source of energy has been competitive due to the incentives offered for this source. Given this perspective, the present study aims to present possibilities of installing solar photovoltaic power plants in the state of Rio Grande do Sul. The proposed plant has a generation capacity of 30 MWp . This study aims to present a proposal to diversify the electricity generation in the state of Rio Grande do Sul, presented a new alternative source of renewable energy . For this achievement, the transmission lines and existing substations in the state of Rio Grande do Sul were studied as a way to evaluate the possibility of direct connection of the new plant, with the objective of reducing the cost of installation. The calculation of the final system yield for the state of Rio Grande do Sul and cost analysis of installing this source in the state was held , as well the limit price for centralized photovoltaic generation in the state .*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Power Plant, Transmission Line, Substation.*