

USO DO SIMULADOR SISIFO PARA LEVANTAMENTO DO POTENCIAL DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NOS EDIFÍCIOS DO CAMPUS SÃO PAULO DA USP

Mario Luiz Ferrari Pin – mario.pin@usp.br

Roberto Zilles – zilles@usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente

Resumo. Este trabalho teve como objetivo utilizar o simulador SISIFO para determinar o potencial de geração fotovoltaica com sistemas de microgeração sobre os edifícios dentro do campus São Paulo da USP. O SISIFO é um simulador de sistemas fotovoltaicos de código aberto desenvolvido pelo Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madrid (IES-UPM) em 2014. A partir da edição da Resolução Normativa nº482 em 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), torna-se possível no Brasil a instalação de sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis, de forma distribuída, onde o consumidor conectado à rede de distribuição injeta energia na rede elétrica e com isso gera créditos que são usados nos meses subsequentes. A Resolução Normativa nº 687 da ANEEL e o Convênio 16 do CONFAZ, ambos de 2015, estabeleceram novas regras que tornaram a geração distribuída mais atrativa economicamente, resultando no crescimento do número de instalações de forma acelerada a partir deste ano. A usina fotovoltaica do Instituto de Energia e Ambiente é formada por quatro instalações distintas e tem uma potência instalada de 540 kWp. Os dados de produção e de desempenho do primeiro ano de operação das instalações que se encontram sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin e do Instituto de Estudos Brasileiros foram utilizados para que os parâmetros mais adequados fossem inseridos no SISIFO. Com esses parâmetros, juntamente com dados solarimétricos do projeto SWERA e meteorológicos do INMET utilizou-se o SISIFO para simular a capacidade de produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos de microgeração sobre os edifícios identificados no campus a partir de imagens de satélite. A capacidade anual de produção de energia elétrica calculada para esses sistemas é de 2.600 MWh o que corresponde a 3,1% do consumo anual de eletricidade do campus.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Simulação, Sistemas Fotovoltaicos

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente preocupação relacionada ao meio ambiente nas últimas décadas, atenção tem sido colocada no desenvolvimento de formas mais limpas e eficientes de geração de energia, em substituição aos combustíveis fósseis e de grandes usinas geradoras longe dos centros de consumo. Uma das alternativas é o emprego da geração distribuída de energia elétrica, onde a eletricidade é gerada de forma descentralizada em pequenas centrais de produção conectadas ao sistema de distribuição e, portanto próximas aos consumidores (ACKERMANN et al., 2001).

A resolução normativa nº482 editada em 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou a geração distribuída de energia elétrica a partir de fontes renováveis no Brasil, estabelecendo regras e condições de acesso ao sistema de distribuição de energia elétrica. Nessa resolução a ANEEL propõe um sistema de compensação de energia, ou *net metering*. Com esse sistema, o consumidor não precisa consumir toda energia produzida instantaneamente, caso a produção de energia elétrica seja superior ao consumo próprio, o consumidor injeta essa energia excedente na rede de distribuição, esta é transformada em créditos de energia elétrica que podem ser utilizados pelo consumidor para abater o consumo de energia da rede elétrica nos momentos em que a geração própria não atende toda a sua demanda (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012). A resolução normativa nº482/2012 e sua revisão, a resolução normativa nº687 de 2015, estabelecem dois tipos de geração distribuída, a microgeração, que são sistemas com potência instalada de até 75 kW e minigeração, sistemas com potência instalada entre 75 kW e 3 MW para sistemas hídricos e 5 MW para demais fontes de energia renováveis, fica estabelecido também que os créditos de energia gerados podem ser utilizados em um prazo de até 60 meses (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

Para um país como o Brasil, com grande extensão territorial e alta incidência de radiação solar, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma das escolhas mais promissoras para a geração distribuída (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014). Esta modalidade nas últimas décadas tem adquirido cada vez mais seu espaço, consequência do aumento da tarifa de energia elétrica, o avanço na tecnologia com equipamentos mais eficientes e ao barateamento na produção de módulos fotovoltaicos e equipamentos relacionados (CHANG, 2012), (GRANDIN, 2012).

Assim, o objetivo deste trabalho foi levantar o potencial de geração fotovoltaica através de sistemas de microgeração para os telhados dos edifícios do campus São Paulo da USP. Para isso apresenta-se a revisão da legislação

pertinente na seção dois. Na seção três descreve-se a usina fotovoltaica do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE), com detalhes para uma de suas quatro instalações, que se localiza sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin e do Instituto de Estudos Brasileiros (IEB). A seção quatro apresenta o simulador de sistemas fotovoltaicos SISIFO e a sua parametrização feita a partir dos dados reais de produção de energia do sistema instalado sobre a Biblioteca Brasileira e IEB obtidos entre abril de 2015 e maio de 2016. Na quinta seção são identificados através de imagens de satélite os telhados dos edifícios do campus São Paulo da USP que são viáveis para a instalação de sistemas de microgeração fotovoltaica, ainda mostra-se nesta seção, as simulações para cada telhado e soma total.

2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Seguindo uma tendência mundial, o Brasil tem reestruturado continuamente o seu sistema elétrico. Principalmente a partir da década de 90, profundas mudanças foram impostas nas instituições relacionadas à geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Novas leis e regulamentações surgiram desde então para possibilitar a geração de energia elétrica de forma distribuída.

A geração de energia elétrica de forma distribuída era proibida no Brasil até a década de 60, sendo que até meados dos anos 90 era permitida somente para autoprodução, sem que fosse permitida a conexão à rede de distribuição (BRAUN-GRABOLLE, 2010). No ano de 1995 foi sancionada a lei 9.074 que criou o conceito de consumidor livre (BRASIL, 1995) e em 1996 o decreto nº 2.003 que regulamentou a produção de energia elétrica por Produtor Independente de Energia (PIE) e por Autoprodutor de Energia (APE) (BRASIL, 1996). A Lei 10.438 de 2002 instituiu o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, (PROINFA), estabelecendo incentivos à geração de energia elétrica através de fontes alternativas de energia e cogeração qualificada (BRASIL, 2002). Em 2004 é editado o decreto 5.163 que torna possível a compra de energia elétrica proveniente de geração distribuída pelas concessionárias (BRASIL, 2004).

Até então, apesar da energia elétrica gerada distribuídamente poder ser comprada pelas concessionárias, estas não eram obrigadas a tal. Em 2012 a Resolução Normativa nº482 foi editada pela ANEEL e estabeleceu que, embora as concessionárias não sejam obrigadas a pagar um valor monetário pela energia excedente gerada por geradores distribuídos, estas devem computar e acumular créditos de energia, os quais o consumidor pode abater na conta de energia elétrica nos meses subsequentes caso a geração local seja menor que o consumo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

Localizado em uma região tropical, o Brasil é um país privilegiado para a instalação de sistemas fotovoltaicos, pois a incidência da radiação solar é alta em todo o território nacional, mesmo nos meses de inverno (TOLMASQUIM, 2016). A irradiação anual em qualquer lugar do Brasil, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, é de 1500 a 2500 kWh/m², se mostrando superior a países onde a geração de energia solar fotovoltaica é muito difundida, como é o caso da Alemanha (900 - 1250 kWh/m²) e Espanha (1200 - 1850 kWh/m²) (PEREIRA et al., 2006).

2.1. Resolução normativa nº482/2012

A Resolução Normativa nº482 foi editada pela ANEEL em 17 de abril de 2012 e estabeleceu as regras para acesso à rede de distribuição através de mini ou microgeração e o sistema de compensação de energia através dos créditos de energia (AGÊNCIA DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012). Este foi o resultado da consulta pública nº 15 de 2010 (10/09/2010 a 09/11/2010) e da audiência pública nº 42 de 2011 (11/08/2011 a 14/10/2011) que tiveram como objetivo discutir os aspectos legais da inserção de geradores de pequeno porte através da conexão de forma distribuída.

Em 24 de novembro de 2015 é editada pela ANEEL a Resolução Normativa nº 687 que modifica alguns pontos da RN 482/2012 e estabelece algumas novas regras como as de geração compartilhada, autoconsumo remoto e empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

As definições de micro e minigeração são apontadas em seu artigo 2º com valores limites de potência de geração que foram alterados a partir de 2015 com a RN 687 e são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Limites de potência para micro e minigeração.

Microgeração	Potência instalada menor que 75 kW para cogeração qualificada e fontes renováveis de energia.
Minigeração	Potência instalada maior que 75 kW e menor que 3 MW para fontes hídricas ou menor que 5 MW para cogeração qualificada e demais fontes renováveis de energia.

Outra mudança importante com a RN 687/2015 foi a diferenciação entre micro e minigeração quanto aos custos com a troca do medidor de energia e eventuais melhorias ou reforços do sistema de distribuição, desobrigando o consumidor conectado como microgerador a dividir esses custos, e, portanto cabendo esses custos integralmente à concessionária.

O sistema de compensação de energia elétrica instituído por essa resolução normativa versa que a energia ativa injetada pelo consumidor na rede de distribuição será cedida a título de empréstimo gratuito à concessionária, gerando assim um crédito de energia com validade de até 60 meses, ou seja, caso a geração seja maior que o consumo em um determinado mês, o consumidor recebe um crédito de energia, que poderá ser utilizado nos próximos 60 meses, caso o consumo seja maior que a geração no período.

Ressalta-se que a cobrança de impostos na fatura de energia elétrica de consumidores com micro ou minigeração possuem critérios específicos. O Conselho Nacional de Política Fazendária, (CONFAZ), estabeleceu em seu Convênio ICMS 6 em abril de 2013 que a base de cálculo para a cobrança de ICMS nas faturas de energia elétrica seria sobre toda energia consumida pela unidade descartando qualquer compensação a partir da produção de energia pelo consumidor. Essa cobrança de ICMS sobre toda a energia consumida sem descontar a energia gerada reduziu a atratividade para a instalação de sistemas fotovoltaicos de forma distribuída. Para solucionar essa questão, o CONFAZ publicou o Convênio 16 em 22 de abril de 2015, revogando o Convênio 6/2013, que autorizou os estados cobrarem somente o ICMS sobre a diferença da energia consumida e a energia gerada. Porém, deixou a possibilidade para os estados aderirem ou não a esse novo convênio. O estado do Amapá foi o último estado até agosto de 2017 a aderir ao Convênio 16/2015, totalizando vinte e dois estados e o Distrito Federal, restando apenas os estados do Amazonas, Espírito Santo, Paraná e Santa Catarina para aderirem a esse Convênio. Com relação ao PIS/COFINS, que são impostos de âmbito federal, em 6 de outubro de 2015 foi publicada a lei nº 13.169/2015 definindo que a cobrança de tais impostos seria feita somente sobre a diferença entre a energia consumida e a energia gerada pelas unidades com micro ou minigeração instaladas.

2.2. Evolução das instalações de GD no Brasil

A evolução dos sistemas de geração distribuída no Brasil aconteceu de forma tímida até o primeiro semestre do ano de 2015, quando começou um aumento acentuado no número de instalações. O número de consumidores com sistemas de micro ou minigeração ao final do ano de 2016 corresponde a 4,4 vezes o número no final do ano de 2015, o que indica um aumento expressivo das instalações, porém, como indicado na Nota Técnica nº 0056/2017 da ANEEL ainda é abaixo do potencial de expansão no país (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017). Entre abril e junho de 2015 iniciou-se um grande aumento no número de instalações de micro e minigeração no Brasil o que coincide com a publicação do Convênio 16/2015 do CONFAZ, detalhado anteriormente, que evidencia o quanto essa adequação na cobrança de impostos sobre a fatura de energia elétrica pode fazer uma grande diferença na atratividade para a instalação de sistemas de geração distribuída.

Na Nota Técnica nº 56/2017 a ANEEL, relata uma projeção para o número de instalações residenciais e comerciais, assim como a potência instalada de geração distribuída até o ano de 2024. Nesta nota a ANEEL revisa para baixo a projeção feita pela SRD em 2015, publicada no Memorando nº 471/2015-SRD/ANEEL, reduzindo de 28% a 30% do esperado a partir de 2019. E concluem que até o ano de 2024 deverão existir 886,7 mil unidades consumidoras recebendo créditos de energia, com 808,3 mil no setor residencial e 78,4 mil no setor comercial (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017).

A Fig. 1 mostra a evolução trimestral das instalações fotovoltaicas de micro e minigeração no Brasil a partir de 2012.

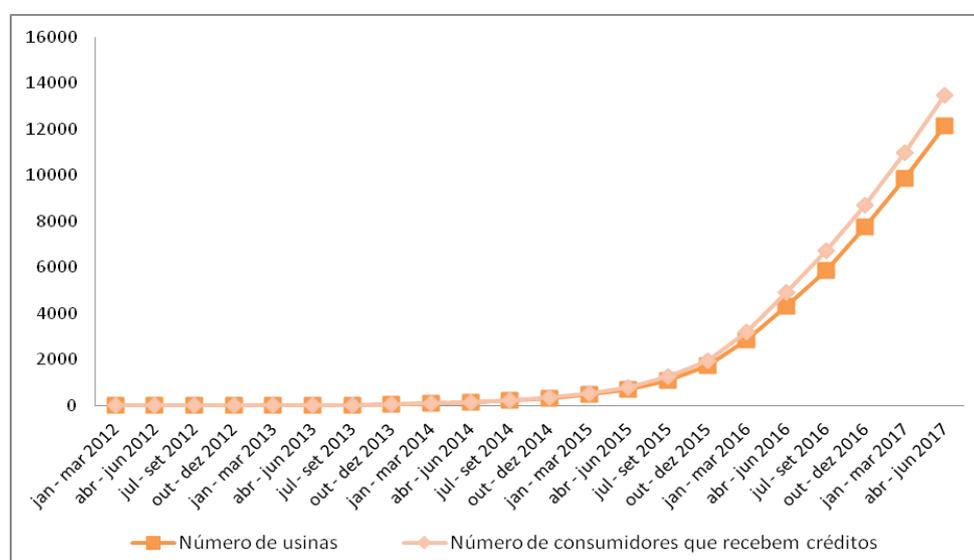


Figura 1 - Número acumulado de instalações de micro e minigeração fotovoltaica no Brasil.

3. USINA FOTOVOLTAICA DO IEE-USP

Através do projeto PD-0068-0029/2011 - Desenvolvimento de competências e avaliação de arranjos técnicos e comerciais em geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE-USP instalou quatro sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, que, juntos, somam 540 kWp. Cada um desses quatro sistemas apresenta configurações diferentes de montagem, sendo: um sistema BIPV (*building-integrated photovoltaics*), que compreende uma cobertura de estacionamento integrada com sistema fotovoltaico em frente ao prédio da administração do IEE-USP, com potência instalada de 150 kWp em uma configuração com múltiplos inversores pequenos afixados nas colunas da estrutura. Um sistema (CTPV), que compreende um sistema central instalado no solo sobre o gramado atrás do prédio da administração do IEE-USP, com capacidade instalada de 156 kWp em uma configuração de um único inversor central. O terceiro sistema é um BAPV (*building-applied photovoltaics*) instalado sobre o telhado do prédio da administração do IEE-USP, com capacidade de 78 kWp para estudos de compensação de reativos. E, finalmente, o quarto sistema, que também é um BAPV, instalado sobre a Biblioteca Brasileira e do IEB, com potência instalada de 156 kWp em uma configuração com 10 inversores de 15 kW de potência em corrente alternada.

A energia gerada pela usina fotovoltaica do IEE-USP corresponde a cerca de 1% da energia consumida pelo campus São Paulo da USP o que faz com que toda energia gerada pelo sistema seja consumida dentro do próprio campus, não ocorrendo, portanto exportação de energia para a concessionária de distribuição, uma vez que a medição de energia para fins de faturamento é feita em um único ponto, na subestação de entrada do campus, localizada próximo à portaria número 2.

Nas Fig. 2 e Fig. 3 visualizam-se as quatro instalações que compõem a usina fotovoltaica do IEE-USP.



Figura 2 - Instalações fotovoltaicas no IEE-USP.



Figura 3 - Instalação sobre a Biblioteca Brasileira .

3.1 Sistema sobre o telhado da Biblioteca Brasileira Guita e Jose Mindlin (BAPV)

Estrutura de fixação. Os módulos fotovoltaicos são instalados em orientação retrato sobre uma estrutura metálica desenhada para resistir ao peso dos equipamentos e às forças exercidas devido a intempéries. Essa estrutura é fixada com parafusos autobrocantes no telhado do edifício, arruelas, buchas e uma fita desenvolvida para esse propósito garantem a impermeabilização do telhado. Cada estrutura suporta sessenta módulos, dispostos em três séries cada. A inclinação da estrutura é de 18° com relação ao plano horizontal e a orientação é a mesma do edifício, cerca de 30° voltado para o leste em relação ao norte.

Instalação elétrica. O sistema BAPV é um gerador fotovoltaico instalado sobre o telhado da Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin de 156 kWp. São utilizados dez inversores totalizando uma potência nominal de 150 kW. A montagem dos inversores é feita através de uma estrutura metálica onde os dez inversores são dispostos em dois arranjos de cinco inversores cada.

A saída de tensão c.a. do inversor é trifásica 220/380 V e é conectada ao quadro de baixa tensão em um eletrocentro que está instalado no gramado em frente à edificação, esse eletrocentro contém todo o sistema de proteção e o transformador elevador para média tensão, fazendo a conexão com a rede elétrica local através da subestação de energia do edifício da biblioteca. Na Fig. 4 mostra-se um diagrama unifilar de todo o sistema.

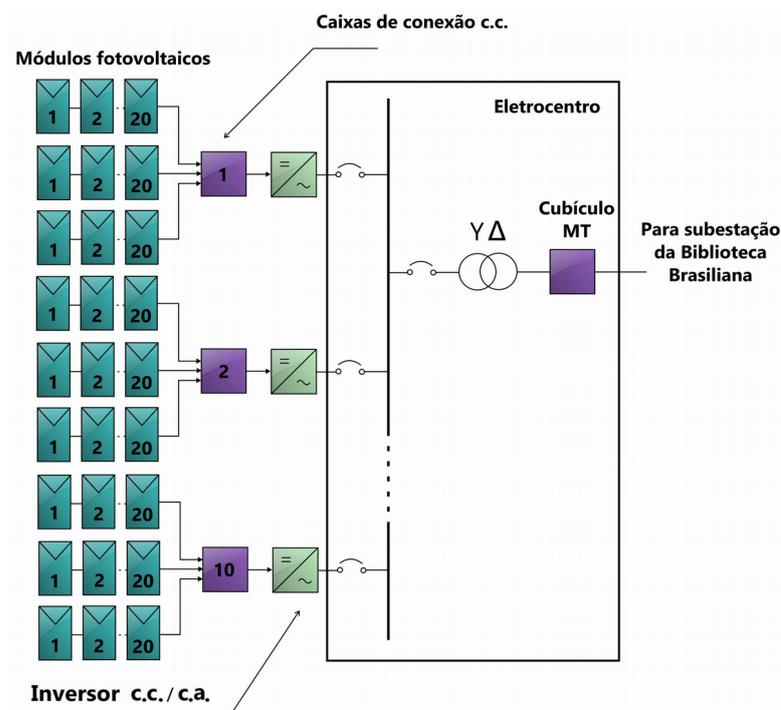


Figura 4 - Esquema elétrico do sistema BAPV sobre o edifício da Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin.

3.2. Dados do primeiro ano de operação da instalação sobre a Biblioteca Brasileira e IEB

Os dados de produção e os indicadores de desempenho da usina BAPV são apresentados na Tab. 2. Pode-se observar que o fator de capacidade anual do sistema ficou em 13,3% dentro dos limites considerados como bons para o Brasil que seriam entre 13% e 18% (BENEDITO, 2009). A taxa de desempenho anual do sistema ficou em 75,5% também dentro do que é considerado como ótimo por Almeida (2012). É importante lembrar que ao longo desse primeiro ano de operação os módulos fotovoltaicos nunca foram limpos devido ao problema de abastecimento de água enfrentado na cidade de São Paulo durante esse período, gerando uma redução de desempenho entre 6% e 8%, como descrito no relatório de produção do primeiro ano de operação da usina (INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE, 2016), ainda assim apresentaram desempenho dentro do que é descrito na literatura como aceitável.

Tabela 2 - Produção de energia elétrica e indicadores de desempenho da usina BAPV.

	Produção (kWh)	Fator de capacidade (%)	Produtividade (kWh/kWp)	Taxa de desempenho (%)
mai/15	12.450	10,7	79,8	83,4
jun/15	12.690	11,3	81,3	75,7
jul/15	11.920	10,3	76,4	76,8
ago/15	17.110	14,7	109,7	70,8
set/15	13.400	11,9	85,9	81,5
out/15	16.360	14,1	104,9	76,3
nov/15	13.580	12,1	87,0	75,0
dez/15	16.490	14,2	105,7	73,2
jan/16	17.040	14,7	109,2	75,5
fev/16	17.000	15,7	109,0	74,4
mar/16	16.750	14,4	107,4	72,7
abr/16	17.740	15,8	113,7	70,4
ANO	182.530	13,3	1.169,9	75,5

4. SIMULADOR SISIFO

O SISIFO é um programa de computador simulador de sistemas fotovoltaicos de código aberto desenvolvido pelo Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madrid (IES-UPM) em 2014. A linguagem de programação utilizada no desenvolvimento deste programa foi o Matlab que posteriormente foi traduzido para a linguagem PHP para aplicação web (INSTITUTO DE ENERGÍA SOLAR - UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2014). O

programa permite simular diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos, desde pequenas instalações para geração distribuída sobre telhados de residências até grandes centrais geradoras. Na versão web, utilizada neste trabalho, os cálculos são feitos no servidor do programa e não na máquina do usuário, não exigindo, portanto, que o usuário possua uma máquina com grande capacidade de processamento.

4.1 Entrada de dados no simulador

Na primeira tela do simulador atribui-se um nome ao projeto e são inseridos os dados de localização da instalação. A localização pode ser inserida de três maneiras diferentes: buscando diretamente no mapa; digitando um endereço; ou entrando com as coordenadas de forma manual. Neste estudo os dados de localização para a simulação foram inseridos de forma manual.

Na segunda etapa da simulação os dados meteorológicos do local da instalação são inseridos. Existem três métodos de inserção dos dados meteorológicos no SISIFO: médias mensais de forma manual; médias mensais extraídas da base de dados PVGIS; e através de uma planilha contendo uma série histórica de medidas no local da instalação. Uma vez que o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE-USP possui uma estação solarimétrica no campus de São Paulo da USP, que dispõe de armazenamento dos dados históricos, os dados meteorológicos e solarimétricos para as simulações neste estudo foram inseridos através de uma planilha tabulada de acordo com o modelo fornecido no sítio do simulador.

Os módulos fotovoltaicos são parametrizados na terceira tela de inserção dos dados.

A primeira escolha a ser feita diz respeito à tecnologia dos módulos fotovoltaicos que serão utilizados no projeto. Neste estudo todas as simulações foram feitas com módulos construídos com tecnologia de silício cristalino, uma vez que é a tecnologia mais difundida comercialmente. Após a seleção do silício cristalino como tecnologia empregada nos módulos fotovoltaicos, é necessário selecionar qual modelo de cálculo de potência o simulador irá utilizar. Para este estudo foi utilizado o modelo que utiliza somente o coeficiente de temperatura nos cálculos, uma vez que os parâmetros relacionados à irradiância não estão disponíveis no *data sheet* do fabricante.

No SISIFO é possível simular diversos tipos de arranjos fotovoltaicos, essa é a primeira seleção que deve ser feita ao abrir a aba "*PV Generator*". Para este estudo a opção utilizada foi a de montagem fixa sobre o solo ou telhado (*Ground or roof*), uma vez que se trata de instalações sobre o telhado de edificações. Após a seleção do tipo de montagem, é necessário preencher os parâmetros de montagem do gerador fotovoltaico. É através desses parâmetros que o simulador calcula o rendimento do gerador fotovoltaico levando em conta as inclinações, orientações do telhado e do gerador e o sombreamento causado entre as fileiras de módulos fotovoltaicos.

Na próxima tela insere-se os parâmetros de balanço do sistema, que consistem nas eficiências dos inversores, perdas nos transformadores e perdas no cabeamento do sistema. Para calcular a eficiência do inversor são necessários três parâmetros que são obtidos experimentalmente:

- k_0 é relacionado às perdas do inversor operando sem carga;
- k_1 é relacionado às perdas lineares em relação a potência do inversor;
- k_2 é relacionado às perdas por efeito Joule no inversor.

4.2. Opções da simulação

O SISIFO dispõe de algumas opções de simulação e alguns modelos de cálculo que são selecionados pelo usuário, otimizando assim o tipo de dados de entrada e as características de cada localidade e de cada sistema fotovoltaico.

As primeiras opções a serem definidas no simulador são as opções básicas (*Basic Options*).

Um dos parâmetros a serem inseridos nas opções básicas é o impacto da sujidade nos módulos fotovoltaicos (*Soiling impact*). No SISIFO é possível inserir quatro níveis diferentes de sujidade nos módulos fotovoltaicos para a simulação, cada um correspondendo a uma porcentagem de perdas na geração, são eles:

- *Clean* - 0% de perdas;
- *Low* - 2% de perdas;
- *Medium* - 3% de perdas;
- *High* - 8% de perdas.

Esse valor depende de diversos fatores, como a frequência de limpeza dos painéis fotovoltaicos, o tipo de solo do local, ventos, etc. (KIMBER et al., 2006). Para esse parâmetro foram utilizados os valores que melhor aproximam a simulação dos dados reais de produção do sistema BAPV instalado sobre a Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin, como serão mais bem detalhados no item 4.3.

A seguir modifica-se as opções avançadas, onde usuários mais experientes podem selecionar os modelos de algoritmos que o simulador deve usar para realizar dois passos: calcular a irradiação no plano dos módulos a partir da dos dados solarimétricos e de posicionamento do gerador fotovoltaico e o outro para descontar as perdas por sombreamentos, sujeira acumulada nos módulos fotovoltaicos, ângulo de incidência e pela resposta espectral.

A caixa de opções *Spectral Response* possibilita selecionar se o modelo proposto por Martín e Ruiz (1999) para correção do espectro solar de referência utilizando dados meteorológicos será usado ou não. No artigo em que apresentam esse modelo os autores concluem que ele exerce pouca influência para sistemas fotovoltaicos que utilizam módulos de silício cristalino, porém sendo bastante indicados para tecnologia de silício amorfo, podendo chegar a uma

variação de até 20% em condições de céu nublado nos meses de inverno ou outono. Como neste estudo utilizou-se exclusivamente a tecnologia de silício cristalino, essa opção foi desabilitada nas simulações realizadas.

A seguir escolhe-se o modelo matemático para o cálculo da radiação difusa em *Diffuse Radiation Modeling*. Nessa caixa é possível selecionar três opções, são dois modelos anisotrópicos e um modelo isotrópico. As duas opções de modelos anisotrópicos são os modelos de Hay e Perez. David, Lauret e Boland (2013) conduziram um experimento para comparar quatro modelos de radiação solar no plano inclinado, incluindo os modelos de Hay e Perez, eles concluíram que apesar dos quatro modelos apresentarem resultados próximos, o modelo de Perez foi o que apresentou os menores erros e, portanto foi o modelo utilizado nas simulações neste trabalho.

Na sequência determina-se o modelo que será adotado para a influência do sombreamento no gerador fotovoltaico. Aqui existem quatro opções disponíveis: *Optimistic*; *Pessimistic*; *Classic*; e um modelo proposto por Martínez-Moreno, Muñoz e Lorenzo (2010) quando fizeram um estudo experimental para desenvolver um modelo mais preciso para determinar as perdas por sombreamento em um gerador fotovoltaico, fizeram também uma comparação do modelo matemático criado por eles com geradores fotovoltaicos em operação, onde concluíram que o modelo apresenta um bom desempenho. Neste trabalho todas as simulações foram feitas utilizando o modelo matemático de Martínez para o cálculo das perdas por sombreamento.

No parâmetro *Ground Reflectance* deve ser introduzido o valor de refletância do solo ao redor do gerador fotovoltaico, que varia de 0,1 para grama até 0,8 para neve. Quando não se sabe ao certo o valor índice de refletância do solo, deve-se usar o valor de 0,2 (INSTITUTO DE ENERGÍA SOLAR - UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2014).

4.3. Simulação da geração de energia elétrica da instalação sobre a Biblioteca Brasileira / IEB utilizando o SISIFO

Para a validação dos parâmetros do simulador SISIFO realizou-se uma simulação do primeiro ano de funcionamento da usina fotovoltaica BAPV instalada sobre a Biblioteca Brasileira / IEB, compreendido entre maio de 2015 e abril de 2016. Os dados solarimétricos e meteorológicos utilizados para a simulação foram obtidos da estação solarimétrica do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE que fica localizada dentro do campus São Paulo da USP. Como dados de temperatura ambiente estavam indisponíveis em alguns dias na estação do LSF-IEE, foram utilizados dados do Instituto Nacional de Meteorologia, (INMET), através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, (BDMEP). Na Tab. 3 apresentam-se os dados utilizados na simulação.

Tabela 3 - Dados solarimétricos utilizados para a simulação do primeiro ano de funcionamento da usina BAPV.

	Irradiação Global horizontal média diária (Wh/m²/dia)	Temperatura máxima diária média (°C)	Temperatura mínima diária média (°C)
mai/15	3.349,2	22,9	15,6
jun/15	4.187,1	23,2	14,1
jul/15	3.645,2	22,8	14,2
ago/15	5.423,5	26,3	14,9
set/15	4.032,9	26,7	16,6
out/15	4.569,5	27,8	17,8
nov/15	3.725,3	27,0	18,9
dez/15	4.326,9	28,9	19,7
jan/16	4.416,3	27,9	19,2
fev/16	4.805,6	29,8	20,6
mar/16	4.546,3	28,5	19,2
abr/16	5.901,1	29,5	19,0

Na página de opções básicas e avançadas foram inseridos os parâmetros já antes mencionados, o único parâmetro variado nas simulações foi o que indica a redução de desempenho da usina fotovoltaica devido ao nível de sujeira acumulada sobre os módulos fotovoltaicos, uma vez que esse é um parâmetro que vai variar de localidade para localidade. Uma comparação com os valores reais de produção da usina BAPV e a simulação para diferentes níveis de acúmulo de sujeira nos módulos fotovoltaicos pode ser vista na Tab. 4.

Tabela 4 - Resultados de simulações para diversos níveis de acúmulo de sujeira no painel fotovoltaico.

Mês	Medido (kWh)	Nível de acúmulo de sujeira no painel fotovoltaico			
		Limpo 0% (kWh)	Leve 2% (kWh)	Médio 3% (kWh)	Alto 8% (kWh)
mai/15	12.450	12.714	12.296	12.113	11.173
jun/15	12.690	13.132	12.715	12.536	11.538
jul/15	11.920	12.667	12.242	12.063	11.102
ago/15	17.110	19.039	18.496	18.250	16.974
set/15	13.400	15.650	15.186	14.980	13.908
out/15	16.360	19.051	18.506	18.265	17.016
nov/15	13.580	15.765	15.281	15.071	13.963
dez/15	16.490	18.800	18.216	17.970	16.672
jan/16	17.040	19.359	18.786	18.536	17.194
fev/16	17.000	18.507	17.976	17.743	16.536
mar/16	16.750	18.467	17.937	17.703	16.480
abr/16	17.740	20.907	20.336	20.073	18.731
ANO	182.530	204.058	197.973	195.303	181.287
Diferença para o medido		11,8%	8,5%	7,0%	-0,7%

A escolha do parâmetro de acúmulo de sujeira que promove uma redução de desempenho em 8% (*High*) se mostra o mais adequado e representa a realidade da instalação, que durante esse primeiro ano de operação em momento algum teve seus módulos lavados a não ser pelas chuvas. Fixando então o parâmetro de máximo acúmulo de sujeira observa-se na Fig. 5 a variação do valor medido para o valor simulado ao longo do ano.

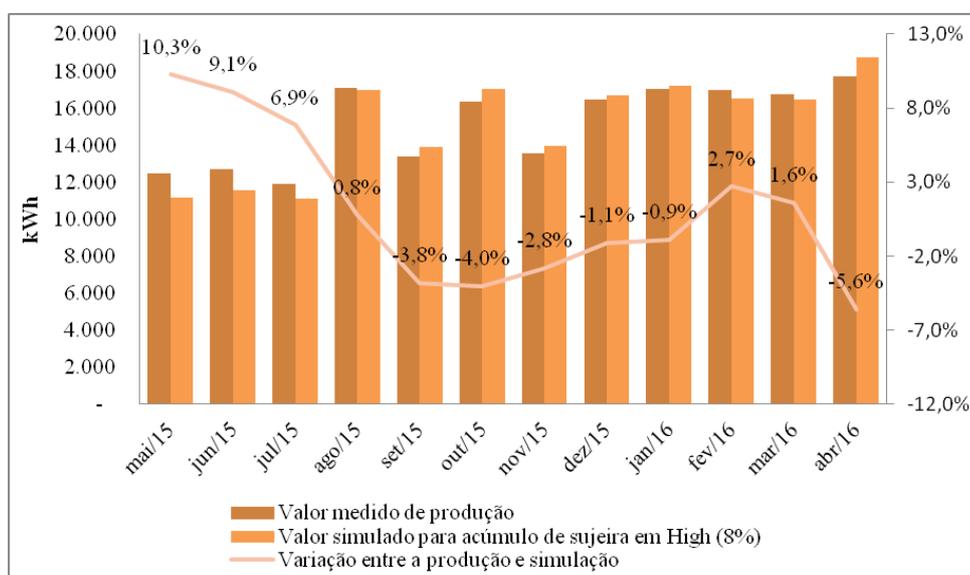


Figura 5 - Comparação entre o valor medido de produção da usina fotovoltaica e o valor simulado com os parâmetros selecionados.

Verifica-se que a diferença entre o valor medido de produção da usina BAPV e o valor simulado com os parâmetros selecionados ficou entre 10,3% e -5,6% com uma variação anual média de apenas -0,7%.

5. ANÁLISE DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO NO CAMPUS DA USP EM SÃO PAULO

Para identificar os locais de interesse para a instalação de sistemas fotovoltaicos BAPV de microgeração no Campus São Paulo da USP, imagens de satélite foram utilizadas. A partir dessas imagens foi possível medir a área dos telhados, verificar se não existiam objetos sobre esses telhados que prejudicariam a instalação dos módulos fotovoltaicos e também verificar a existência de obstáculos nos arredores dos edifícios que causariam possíveis sombreamentos excessivos nos módulos fotovoltaicos, o que prejudicaria a geração de energia elétrica.

Alguns edifícios no campus possuem área de telhado muito superior ao necessário para instalar um sistema de microgeração, que são limitados a uma potência máxima de 75 kW e o objetivo desse trabalho, uma vez que podem ser instalados diretamente nos quadros de força de baixa tensão dos edifícios, eliminando a necessidade da aquisição de transformadores elevadores, sistemas de medição para média tensão e eventuais obras de adequação ou reforço do sistema de distribuição, causando um ônus ao consumidor e portanto, reduzindo a atratividade do investimento.

O SISIFO foi utilizado para fazer a simulação de geração de cada um desses telhados sendo configurado com os parâmetros obtidos na seção 4 desse trabalho e com os dados geográficos de cada um dos edifícios selecionados. Foram utilizados como referência módulos fotovoltaicos com as mesmas características dos empregados na usina BAPV sobre a Biblioteca Brasileira e IEB, assim como o ângulo de inclinação e o espaçamento entre eles.

Os dados solarimétricos utilizados nas simulações foram obtidos da base de dados SWERA, utilizando o modelo BRASIL-SR que fornece dados de Irradiação global horizontal com uma resolução de 10 km a partir de imagens de satélite e estações solarimétricas em solo espalhadas pelo país (MARTINS; PEREIRA. ABREU; 2007). A Tab. 5 mostra uma compilação dos dados obtidos nas simulações assim como o valor total de produção.

Tabela 5 - Produção anual de energia elétrica com sistemas de microgeração para os edifícios simulados.

	Produção anual de energia elétrica (MWh)
Conjunto Residencial da USP	260,1
Instituto de Ciências Biomédicas	341,7
Faculdade de Economia e Administração	114,1
Instituto de Química	701,1
Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica	110,2
Departamento de História e Geografia da FFLCH	90,7
Instituto de Geociências	113,3
Centro de Difusão Internacional	196,7
Faculdade de Odontologia	113,9
Faculdade de Medicina Veterinária	107,9
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas	115,2
Instituto Oceanográfico	115,0
Centro de Práticas Esportivas - Raia Olímpica	113,9
Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica	107,0
TOTAL	2.600,8

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo utilizar um simulador para se determinar o potencial de geração fotovoltaica do campus São Paulo da USP através da instalação de sistemas fotovoltaicos de microgeração sobre os edifícios do campus. Para isso realizou-se uma revisão bibliográfica sobre sistemas fotovoltaicos e geração distribuída no Brasil. A usina fotovoltaica do Instituto de Energia e Ambiente sobre a Biblioteca Brasileira e Instituto de Estudos Brasileiros serviu de base para estimar os parâmetros mais adequados a serem inseridos no simulador, para os resultados serem o mais próximo da realidade. O simulador utilizado foi o SISIFO, desenvolvido pelo Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madrid (IES-UPM), este é de código aberto e realiza suas simulações online.

Com o simulador parametrizado adequadamente com os dados obtidos a partir da simulação da usina do IEE, dados solarimétricos e meteorológicos disponibilizados pelo projeto SWERA e pelo INMET respectivamente, sistemas fotovoltaicos sobre os telhados de edifícios identificados com potencial para a instalação de microgeração foram simulados. Foram descartados edifícios que não possuem telhados viáveis para a instalação de sistemas fotovoltaicos, como o da Escola de Educação, formado por diversos domos, o do Instituto de Física, circundado por muitas árvores grandes, que promovem sombreamento excessivo e edifícios visitados previamente, que não apresentam integridade estrutural para a instalação de sistemas fotovoltaicos, como o Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica e o Hospital Universitário.

Comparando os dados de simulação e dados de produção real da usina BAPV sobre a biblioteca Brasileira, o erro da produção de energia elétrica fica entre 10,3% e -5,6%, com erro médio anual de 0,7%, mostrando assim, que o SISIFO se apresenta como uma ferramenta muito útil para o projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados sobre telhados de edifícios que não tenham fontes externas de sombreamento.

A soma total do potencial de geração anual dos sistemas simulados é de 2.600 MWh que corresponde a 3,1% do consumo medido entre abril de 2015 e maio de 2016 de todo o campus.

REFERÊNCIAS

- Ackerman, T.; Andersson, G.; Söder, 2001. L. Distributed generation: a definition. Electric Power Systems Research, v. 57, n. 3, p. 195–204, 20 abr.
- Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012. Resolução normativa n° 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2016.

- Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. Resolução normativa n° 687 de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 08 abr.2016.
- Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. Nota Técnica n°56/2017 de 24 de maio de 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9> Acesso em 10 de junho de 2017.
- Almeida, M. P., 2012. Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Benedito, R. S., 2009. Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por Meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Brasil, 1995. Lei n°9.074 de 7 de julho de 1995. Brasília, DF.
- Brasil, 1996. Decreto n° 2.003 de 10 de setembro de 1996, Brasília, DF.
- Brasil, 2002. Lei n° 10.438 de 26 de abril de 2002, Brasília, DF.
- Brasil, 2004. Decreto n° 5.163 de 30 de julho de 2004, Brasília, DF.
- Braun-Grabolle, P., 2010. A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana. 260f. Tese (Doutorado Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da universidade Federal de Santa Catarina.
- Chang, C. A., 2012. Otimização Técnico Econômica de um Sistema Híbrido Fotovoltaico-Diesel com Banco de Baterias. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Empresa de Pesquisa Energética, 2014. Nota Técnica DEA 19/14: Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro: Empresa de pesquisa energética (EPE), Ministério de minas e energia (MME).
- Gradin, F., 2012. O Sol já vale a pena. Brasil Energia, v. 380, p. 6.
- instituto de Energia e Ambiente, 2016. Relatório da Produção de Energia Elétrica da Usina FV de 540 kWp.
- Instituto de Energia Solar – Universidad Politécnica de Madrid, 2014. An online simulator of PV systems Technical reference manual.
- Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., Wenger, H., 2006. The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States In: WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 4. 2006, Waikoloa. HI. **Proceedings**. Waikoloa.
- Lauret, D. M., Boland, P. J., 2013. Evaluating tilted plane models for solar radiation using comprehensive testing procedures, at a southern hemisphere location. Renewable Energy, v51, p124–131.
- Martín, N., Ruiz, J. M., 1999. A New Method for the Spectral Characterization of PV Modules. Progress in photovoltaics: Research and Applications, v7, p299-310.
- Martínez-Moreno, F., Muñoz, J., Lorenzo, E., 2010. Experimental model to estimate shading losses on PV arrays. Solar Energy Materials & Solar Cells, v94, p2298-2303.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., Abreu, S. L., 2007. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. Solar Energy, v81, p517-528.
- Pereira, E. B., et al., 2006. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE.
- Tolmasquim, M. T., 2016. Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE.

USE OF THE SISIFO SIMULATOR TO GATHER THE POTENTIAL OF PHOTOVOLTAIC MICROGENERATION IN THE BUILDINGS OF CAMPUS SÃO PAULO OF USP

Abstract. *This work aimed to use the SISIFO simulator to determine the potential of photovoltaic generation with microgeneration systems on the buildings within the São Paulo campus of USP. SISIFO is an open-source simulator of photovoltaic systems developed by the Solar Energy Institute of the Universidad Politécnica de Madrid (IES-UPM) in 2014. Since the issuance of Normative Resolution No. 482 in 2012 by the National Electric Energy Agency (ANEEL), it is possible in Brazil to install power generation systems from renewable sources, in a distributed way, where the consumer connected to the grid injects energy into the grid and thereby generates credits that are used in subsequent months. Normative Resolution No. 687 of ANEEL and Agreement 16 of CONFAZ, both of 2015, established new rules that made distributed generation more attractive economically, resulting in an accelerated growth of the number of installations as of that year. The photovoltaic plant of the Institute of Energy and Environment is formed by four distinct installations and has an installed power of 540 kWp. The production and performance data of the first year of operation of the facilities that are on the Brasiliana Guita and José Mindlin Library and the Brazilian Institute of Studies were used so that the most appropriate parameters were inserted in SISIFO. With these parameters, together with solarimetric and meteorological data from the SWERA project and INMET, SISIFO was used to simulate the electric power production capacity from photovoltaic microgeneration systems on buildings identified in the campus from satellite images. The annual electricity production capacity calculated for these systems is 2,600 MWh which corresponds to 3.1% of the annual electricity consumption of the campus.*

Key words: *Distributed Generation, Simulation, Photovoltaic Systems.*