

SISTEMA FOTOVOLTAICO EXPERIMENTAL PARA PESQUISAS CIENTÍFICAS E SUA CLASSIFICAÇÃO CONFORME A IEC 61724-1

Cesar Biasi de Moura (USP) - cbmoura@lsi.usp.br

Arthur Alves Miyazaki (USP) - arthurmiy@usp.br

Roberto Silva Simplicio (USP) - robertothebest666@gmail.com

Rafael Herrero Alonso (Instituição - a informar) - rherrero@lsi.usp.br

Roseli de Deus Lopes (USP) - roseli@lsi.usp.br

Marcelo Knörich Zuffo (Instituição - a informar) - mkzuffo@lsi.usp.br

Resumo:

O monitoramento de dados para sistemas fotovoltaicos dedicados à pesquisa científica, normalmente, representa grandes investimentos frente ao valor do sistema, principalmente quando este é uma microgeração distribuída de pequeno porte. Além disso, ainda há pouco conhecimento publicado sobre sistemas fotovoltaicos voltados à pesquisa que atendam minimamente aos requisitos de monitoramento propostos pela IEC 61724-1 ou ainda sobre quais são as pesquisas científicas que podem ser realizadas dadas as características do sistema de monitoramento instalado. Este artigo descreve a instalação do monitoramento de dados e parâmetros para um sistema fotovoltaico de 5,85 kWp no Centro Interdisciplinar em Tecnologias Interativas da USP (CITI-USP) e apresenta a análise realizada para a classificação do mesmo segundo a norma IEC61724-1, mostrando o potencial de pesquisas científicas que podem ser realizadas. A partir de uma análise criteriosa do local de instalação, do sistema fotovoltaico e diretrizes que a norma estabelece, são apresentados e discutidos os principais aspectos que devem ser considerados no desenvolvimento do sistema de aquisição de dados e monitoramento e os principais critérios que devem ser observados na seleção e instalação de sensores e equipamentos. Foi constatado que o monitoramento instalado pode ser enquadrado, predominantemente, à classe B da IEC 61724-1, na qual foram relatadas as principais considerações para a seleção dos sensores e equipamentos, além do desenvolvimento dos sistemas de aquisição de dados e interface de monitoramento.

Palavras-chave: Monitoramento, IEC 61724, Sistema fotovoltaico

Área temática: Conversão Fotovoltaica

Subárea temática: Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos

SISTEMA FOTOVOLTAICO EXPERIMENTAL PARA PESQUISAS CIENTÍFICAS E SUA CLASSIFICAÇÃO CONFORME A IEC 61724-1

Cesar Biasi de Moura – cbmoura@lsi.usp.br

Arthur Alves Miyazaki – arthurmiy@usp.br

Roberto Silva Simplício – roberto.simplicio@lsitec.org.br

Rafael Herrero Alonso – rherrero@lsi.usp.br

Roseli de Deus Lopes – roseli.lopes@usp.br

Marcelo Knörich Zuffo – mkzuffo@usp.br

Universidade de São Paulo, Laboratório de Sistemas Integráveis do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica, Centro Interdisciplinar em Tecnologias Interativas

Resumo. O monitoramento de dados para sistemas fotovoltaicos dedicados à pesquisa científica, normalmente, representa grandes investimentos frente ao valor do sistema, principalmente quando este é uma microgeração distribuída de pequeno porte. Além disso, ainda há pouco conhecimento publicado sobre sistemas fotovoltaicos voltados à pesquisa que atendam minimamente aos requisitos de monitoramento propostos pela IEC 61724-1 ou ainda sobre quais são as pesquisas científicas que podem ser realizadas dadas as características do sistema de monitoramento instalado. Este artigo descreve a instalação do monitoramento de dados e parâmetros para um sistema fotovoltaico de 5,85 kWp no Centro Interdisciplinar em Tecnologias Interativas da USP (CITI-USP) e apresenta a análise realizada para a classificação do mesmo segundo a norma IEC61724-1, mostrando o potencial de pesquisas científicas que podem ser realizadas. A partir de uma análise criteriosa do local de instalação, do sistema fotovoltaico e diretrizes que a norma estabelece, são apresentados e discutidos os principais aspectos que devem ser considerados no desenvolvimento do sistema de aquisição de dados e monitoramento e os principais critérios que devem ser observados na seleção e instalação de sensores e equipamentos. Foi constatado que o monitoramento instalado pode ser enquadrado, predominantemente, à classe B da IEC 61724-1, na qual foram relatadas as principais considerações para a seleção dos sensores e equipamentos, além do desenvolvimento dos sistemas de aquisição de dados e interface de monitoramento.

Palavras-chave: Monitoramento, IEC 61724, Sistema fotovoltaico

1. INTRODUÇÃO

Entre as fontes de energia renováveis, a solar fotovoltaica vem se destacando como uma alternativa, tanto para a geração centralizada, quanto para a geração distribuída. A primeira, localizada em grandes usinas distantes dos principais centros consumidores, a segunda, instalada junto ao consumidor final.

A energia fotovoltaica é considerada uma fonte de energia intermitente. Portanto, conhecer e monitorar o comportamento climatológico da região onde o sistema fotovoltaico (SF) está instalado é de suma importância para a elaboração de projetos, bem como o monitoramento da sua operação e desempenho (Pinho e Galdino, 2014).

Os dados obtidos durante a operação de um SF são relevantes não apenas para avaliar se os objetivos do projeto foram atingidos, mas também são importantes para a melhoria do projeto e operação do sistema, além de permitirem uma avaliação geral do potencial da tecnologia fotovoltaica adotada. Sendo assim, o *Joint Research Centre* (JRC) foi o primeiro a estabelecer as diretrizes e procedimentos para avaliação de sistemas fotovoltaicos (CEU, 1997), sendo estes, posteriormente, padronizados pela IEC na norma 61724-1 (2017).

Quando se trata do monitoramento de um sistema dedicado à realização de pesquisas científicas ou contratos comerciais com garantia de fornecimento de energia é recomendável, sempre que possível, a adoção de sensores e técnicas de medições que permitam obter dados com maior precisão e acurácia para a avaliação do desempenho, das perdas por degradação do sistema e do potencial de determinada tecnologia fotovoltaica. Vale ainda destacar que os requisitos do sistema de monitoramento podem variar de acordo com o tamanho do sistema, com a instrumentação e o com objetivo pretendido da análise.

As diretrizes descritas na IEC 61724-1 estabelecem três classificações distintas (A, B e C). Monitoramento de sistemas fotovoltaicos pertencentes à classe A (Alta acurácia) ou B (Média acurácia) são mais apropriados para usinas fotovoltaicas e grandes instalações comerciais, já a utilização dos sistemas da classe B ou classe C (Acurácia básica) são mais apropriados para pequenas instalações comerciais e residenciais (IEC, 2017).

Quando o SF é de pequena escala, com potência menor que 20 kWp, por exemplo, os custos para implementar um sistema de monitoramento totalmente aderente a classe A pode ser significativamente maior do que de um sistema da classe B (NREL, 2011), pois muitos dos parâmetros que devem ser monitorados segundo a norma podem ser obtidos através do próprio inversor, não sendo necessário o uso de multimedidores de energia juntamente com transformadores

de corrente (TCs) ou de unidades de monitoramento de *strings* adicionais, todos com alta acurácia. Atualmente muitos dos modelos de inversores fotovoltaicos disponíveis no mercado são capazes de atender os requisitos de acurácia de um sistema de classe B.

Ainda há pouco conhecimento sobre SFs voltados à pesquisa que atendam minimamente aos requisitos de monitoramento propostos pela IEC 61724-1. Esta situação reforça a necessidade de realizar estudos e avaliações desse tipo de sistema de monitoramento.

Dado o exposto acima, este trabalho tem por objetivo descrever o monitoramento implementado para o sistema fotovoltaico experimental (SFE) de 5,85 kWp instalado no CITI-USP no campus da Universidade de São Paulo (USP), bem como mostrar a sua classificação de acordo com a norma IEC 61724-1.

2. DIRETRIZES DA IEC 61724-1 PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A precisão e a complexidade necessárias do sistema de monitoramento dependem do tamanho do SF e dos seus objetivos, como monitoramento da produtividade, avaliação do desempenho, detecção de falhas, avaliação tecnológica, perdas associadas, entre outros fatores internos e externos à tecnologia fotovoltaica.

Segundo a IEC (2017), um sistema de monitoramento da classe B é indicado para a avaliação básica de desempenho, análises de perdas e para documentação de garantia em contratos de performance e geração de sistemas fotovoltaicos. Os sistemas da classe A são indicados para a avaliação de características e desempenho de tecnologias fotovoltaicas, medição precisa da degradação do sistema, identificação e localização de falhas, além de análises da interação e perturbações na rede elétrica provocadas pelo sistema.

Por último a classe C, é adequada, apenas, para a avaliação básica de desempenho do SF, não sendo recomendada para os fins de pesquisa científica e, por tanto, não será abordada em profundidade neste trabalho.

Os requisitos de amostragem e intervalo de gravação dos dados, descritos na seção 6 da norma IEC 61724-1, são mais rigorosos para sistemas da Classe A. O intervalo máximo de amostragem é de 3 segundos para as medidas de irradiação, temperatura, vento e parâmetros elétricos do sistema, e 1 minuto no máximo para os parâmetros de umidade, pluviosidade e sujidade. O intervalo de armazenamento dos dados deve ser de, no máximo, 1 minuto.

Para a classe B, os requisitos passam a ser menos rigorosos, sendo o intervalo máximo de amostragem de 1 minuto para todas as variáveis medidas e 15 minutos o intervalo para armazenamento de dados.

Os requisitos da classe C são os menos rigorosos, mesmo intervalo de amostragem da Classe B e o intervalo para armazenamento de dados deve ser de até 1 hora.

Apesar de a norma estabelecer a periodicidade ideal de amostragem e armazenamento dos dados, é recomendável, se possível, reduzir o intervalo de amostragem e gravação dos dados de cada parâmetro para o mais próximo possível do estabelecido para os sistemas de monitoramento classe A.

O valor estabelecido na norma para o horário da meia-noite é 00:00, pois marca o início de um novo dia na base de tempo nos arquivos de registro. O relógio interno do sistema de monitoramento deve ser ajustado periodicamente, de modo que o erro acumulado não provoque problemas de sincronização e concatenação de dados oriundos de bases e/ou sistemas distintos e independentes, sendo recomendada a utilização de um mecanismo automatizado, como sistema de posicionamento global (GPS) ou protocolo de tempo de rede (NTP) para a realização periódica deste ajuste.

Outro aspecto importante, é a utilização do horário local para se evitar problemas de perda de referência temporal e quebra na estrutura organizacional do arquivo de dados, provocados por eventuais alterações no horário oficial na localidade do SF monitorado. Isso pode evitar problemas de sincronização e dificuldades na concatenação e análise de dados de arquivos de sistemas de monitoramento distintos e independentes, uma vez que estes arquivos podem estar adotando sistemas com referenciais temporais diferentes entre si, por exemplo.

De acordo com a IEC (2017), para os sistemas de monitoramento da classe B e C é permitido que todos os parâmetros de irradiação e fatores ambientais sejam medidos ou estimados através de dados locais ou regionais, ou mesmo através de dados de satélite. Para os sistemas de monitoramento da classe A é permitido, apenas, que estes dados sejam obtidos por monitoramento e medições no mesmo local de instalação do sistema.

A consolidação das variáveis que devem ser monitoradas ou estimadas, o tipo correto de sensor que deve ser empregado, fundo de escala, acurácia, quantidade mínima instalada para sistemas menores que 5 MW e os requisitos mínimos para o sistema de monitoramento das classes A, B e C são mostrados na Tab. 1.

3. O SISTEMA FOTOVOLTAICO EXPERIMENTAL

O SFE de 5,85 kWp está instalado no CITI-USP, localizado no campus da capital, na zona oeste de São Paulo, a menos de 560 m da Av. Marginal Pinheiros e, aproximadamente, a 10 km de distância do centro da cidade, nas coordenadas 23°33'22,12"S; 46°43'47,13"O, sendo que o entorno do terreno apresenta edificações largas com alturas de baixa a média estaturas (10 a 20 m), além da forte presença de vegetação de médio (5 a 10 m) e grande porte (10 a 20 m), conforme apresentado na Fig. 1.

O terreno onde o SFE está instalado possui aproximadamente 1.625 m², sendo que as instalações físicas do CITI-USP ocupam 503,25 m². Dos mais de 1.100 m² de espaço no terreno e outros 136 m² adicionais na cúpula do telhado, 930 m² são ocupados por passagem de pedestres, entradas para carga e descarga, rotas de emergência e contêineres para

armazenamento de materiais e equipamentos, ou área localizada na parte sul, sendo o próprio edifício um obstáculo de sombreamento direto.

Tabela 1 – Parâmetros monitorados, especificação dos sensores, quantidades mínimas de sensores e precisões necessárias para sistemas das classes A, B e C (IEC, 2017)

PARÂMETRO	SÍMB	UNID	A	B	C	DISPOSITIVO	QUANT. MÍNIMA	ACURÁCIA\ RESOL.\ ESCALA	
Irradiância									
Irradiância no Plano Inclinado (POA)	G_i		√	√ ou Est.	√ ou Est.	Classe A: Piranômetro de Termopilha do Padrão Secundário da ISO 9060 ou Célula de Referência	1	Classe A: ≤ 3,0% \ 1 W/m ² \ 0 a 1500 W/m ²	
Irradiância Global Horizontal	GHI		√	√ ou Est.	n/a				
Irradiância Difusa	G_d	W/m ²	√ ⁽¹⁾	√ ou Est.	n/a				Classe B: Piranômetro de Termopilha de Classe Primária da ISO 9060 ou Célula de Referência
Irradiância Normal	DNI	W/m ²	√ ⁽¹⁾	√ ou Est.	n/a	Pireliômetro Padrão Secundário da ISO 9060	1	Classe C: Piranômetro de Termopilha de Classe Secundária da ISO 9060, Célula de Referência, ou Fotodiodo	Classe C: n/a \ 1 W/m ² \ 0 a 1500 W/m ²
Fatores Ambientais									
Temperatura do Módulo Fotovoltaico	T_{mod}	°C	√	√ ou Est.	n/a	Termopares de Filme Fino T ou E, RTDs ou Termistores	6	≤ 2,0 °C	
Temperatura do Ar (Bulbo Seco)	T_{amb}	°C	√	√ ou Est.	√ ou Est.		1	≤ 1,0 °C \ 0,1 °C	
Umidade do Ar		%	n/a	n/a	n/a		1		
Velocidade do Vento		m/s	√	√ ou Est.	n/a		1	≤ 0,5 m/s para ventos ≤ 5,0 m/s; ≤ 10,0% para ventos ≥ 5,0 m/s.	
Direção do Vento		°	√	n/a	n/a		1	≤ 5°	
Razão de Sujidade	SR		√ ⁽²⁾	n/a	n/a		1		
Precipitação de Chuva		mm	√	√ ou Est.	n/a		1		
Parâmetros Elétricos									
Tensão do Array CC	V_A	V	√	n/a	n/a		Por Inversor ou cada String-Box	Classe A: 2,0%; Classe B: n/a; Classe C: n/a	
Corrente do Array CC	I_A	A	√	n/a	n/a			Classe A: 2,0%; Classe B: n/a; Classe C: n/a)	
Potência do Array CC	P_A	kW	√	n/a	n/a			Classe A: 2,0%; Classe B: n/a; Classe C: n/a	
Tensão de Saída CA	V_{out}	V	√	√	n/a		Por Inversor e na Saída do Sistema	Classe A: 2,0%; Classe B: 3,0%; Classe C: n/a	
Corrente de Saída CA	I_{out}	A	√	√	n/a			Classe A: 2,0%; Classe B: 3,0%; Classe C: n/a	
Potência de Saída CA	P_{out}	kW	√	√	√			Classe A: 2,0%; Classe B: 3,0%; Classe C: n/a	
Energia Injetada CA	E_{out}	kWh	√	√	√			Classe A: 0,2S; Classe B: 0,5S; Classe C: Classe 2	
Fator de Potência Injetado	λ		√	√	n/a			Classe A: Classe 1; Classe B: Classe 1; Classe C: n/a	

Legenda: √ = Monitoramento no local do sistema; Est. = Estimado.

¹Para monitoramento do recurso solar e/ou concentrador fotovoltaico com fator de concentração < 20x.

²Se as perdas por sujidade forem maiores ou igual a 2,0% (≥ 2,0%).



Figura 1 – Vista aérea do CITI-USP e do SFE de 5,85 kWp.

Desta maneira, os únicos espaços viáveis e disponíveis para a instalação do SFE, em princípio, eram os 170 m² localizados ao norte do terreno, entre o edifício e o cercado que o delimita, ou os 136 m² localizados na sua cúpula.

A cúpula do telhado do edifício do CITI-USP apresenta perdas por sombreamento muito menores do que na área ao norte do edifício, menos de 1% contra aproximadamente 20% do sistema instalado em solo. Porém, ela apresenta uma série de desvantagens, como a impossibilidade de acesso para os pesquisadores no dia a dia, estrutura fixa que não permite ajuste do ângulo de inclinação, necessidade de contratação de mão de obra especializada para trabalho em altura para a instalação, inspeção, manutenção, lavagem ou quaisquer alterações físicas necessárias, o que tornaria o dia a dia muito difícil e financeiramente dispendioso.

Desta maneira optou-se pela instalação do SFE na área do terreno ao norte do edifício do CITI-USP, sendo que o sistema é dividido em três mesas independentes de 1,95 kWp com ângulo de azimute de -30,0° (Leste) e capacidade para ajuste do ângulo de inclinação em até 12 inclinações distintas entre 0° e 42° com tolerância de $\pm 1,0^\circ$, tendo como principal objetivo a realização de pesquisas científicas em energia fotovoltaica, como a caracterização de sujidade (*Soiling*) e a avaliação de novos dispositivos de monitoramento e otimização do desempenho de sistemas fotovoltaicos.

3.1 Arranjo elétrico

Cada uma das três mesas do SFE (Fig. 2a) é composta por seis módulos da Canadian Solar CS6U-325P de 325 Wp de potência, eficiência de 16,72%, compostos por 72 células de silício policristalino e perda de eficiência em baixa irradiância de no máximo 4,0%. Além disto, cada mesa possui um inversor ABB UNO 2.0 TL-OUTD-S de 2 kVA com proteções de surto integradas do tipo DPS da classe II na entrada de corrente contínua (CC) da *string* e de classe III na saída de corrente alternada (CA) do inversor, com uma chave seccionadora integrada com capacidade de desconexão de 25 A / 600 V.

As mesas contam com uma *string-box* na entrada CC do inversor com uma chave seccionadora com capacidade de desconexão de 25 A / 1000 V e uma proteção de surto do tipo DPS da classe II, além de uma caixa ambientalmente selada (IP67) que abriga um disjuntor bipolar termomagnético curva C de 16 A e duas proteções de surto do tipo DPS também da classe II.

As três mesas estão conectadas em delta em um circuito trifásico do quadro geral do edifício, protegido por um disjuntor tripolar termomagnético curva C de 32 A e três proteções de surto do tipo DPS também da classe II. O edifício do CITI-USP conta com um multimetro de energia BHS BDI-MT292S-95 conectado a três TCs MSQ-0.66 60 da classe 0,5 e primário com relação de 1000/5 A para monitorar seu consumo de energia, demanda e parâmetros elétricos da rede como tensão, corrente, frequência e fator de potência, conforme o diagrama trifilar da Fig. 3.



Figura 2 – (a) SFE de 5,85 kWp, (b) Sistema de aquisição de dados e equipamentos, (c) Sensores e instrumentos (Irradiação, sujidade, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento).

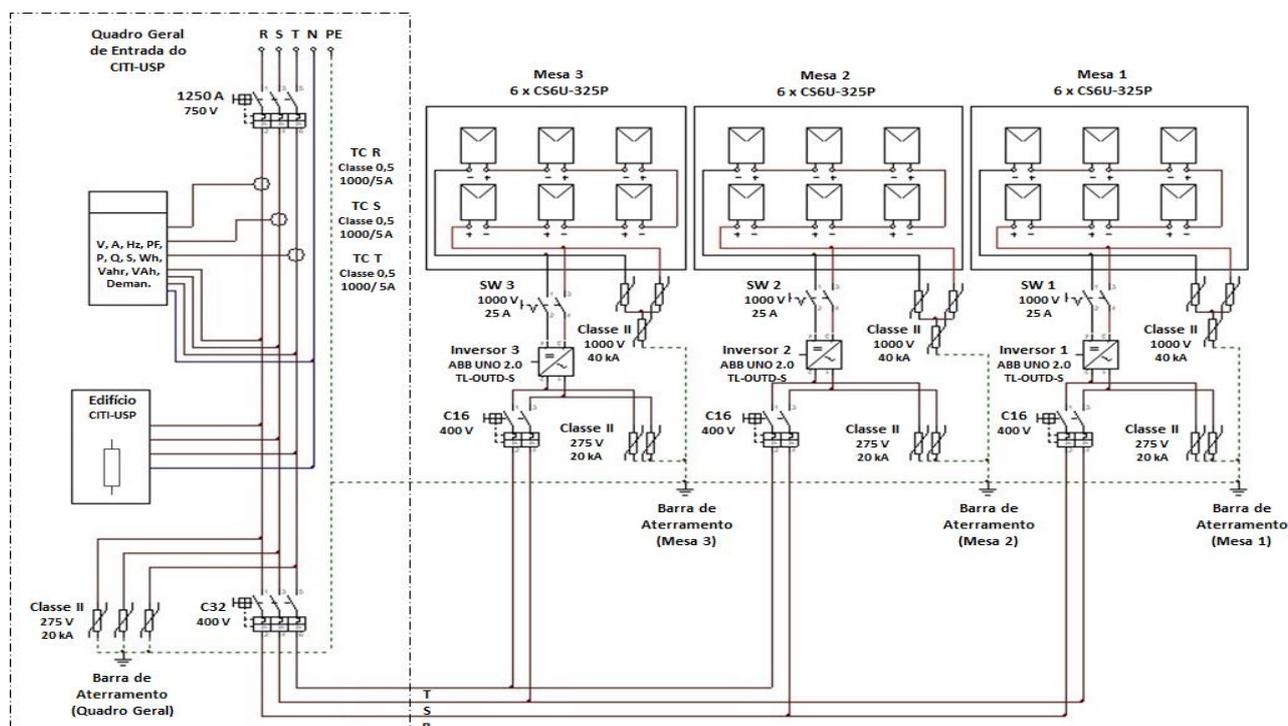


Figura 3 – Diagrama trifilar do SFE de 5,85 kWp.

3.2 Modelagem do entorno e desempenho esperado

A modelagem 3D do edifício e do entorno foi realizada através de fotogrametria obtida com voo de drone.

Utilizando o modelo 3D obtido, plantas de desenho CAD e medições de campo com trena métrica, foi realizada a modelagem da vegetação e edificações com potencial de sombreamento no entorno do SFE. O software PVsyst V6.38 foi utilizado com a base de dados solarimétrica NASA-SSE para o local, conforme a Fig. 4a. A Fig. 4b mostra as isolinhas de sombreamento esperado para o SFE, considerando-se o modelo 3D da Fig. 4a.

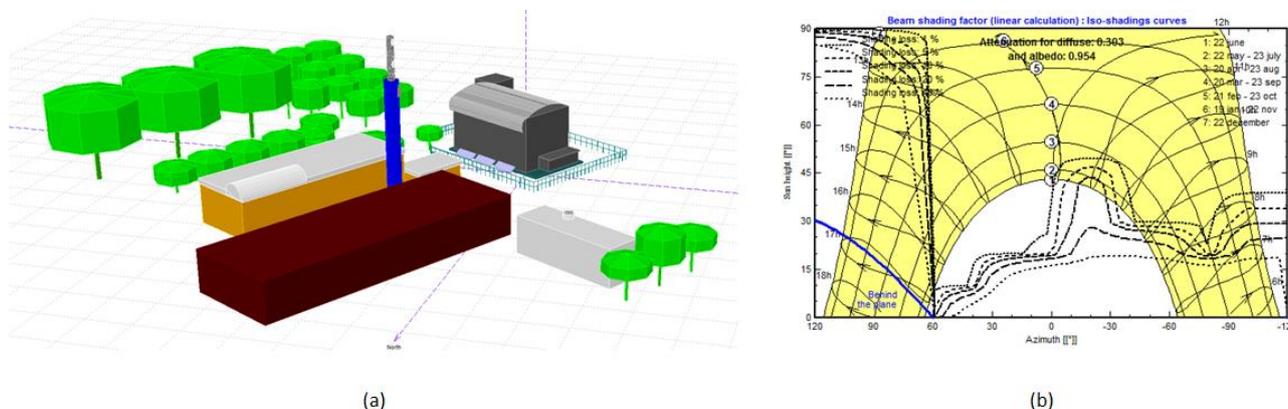


Figura 4 – (a) Modelo 3D da vegetação e edificações com potencial de sombreamento no entorno do edifício do CITI-USP, (b) Isolinhas de sombreamento esperado para o SFE.

O posicionamento dos módulos no local foi escolhido de modo a manter a sua forma e função, seguindo o mesmo alinhamento do edifício do CITI-USP (Zomer et. al., 2014). Desta maneira, para que fosse avaliado o potencial de geração de energia e o *performance ratio* (PR) do SFE, foram consideradas as principais perdas presentes nos SFs para cada um dos 12 ângulos de inclinação entre 0° e 42°, sendo as perdas adotadas na simulação mostradas na Tab. 2.

A estimativa de geração de energia foi de 5.740 a 6.801 kWh, com PR entre 58,0% a 64,7%, para o primeiro ano de operação do SFE, dependendo do ângulo de inclinação, conforme a Fig. 5.

Tabela 2 – Parâmetros de perdas adotadas para o SFE.

PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
Perdas térmicas ("Montagem Livre")	29 W/m ² .K.	Perdas por qualidade dos módulos	-0,4%
Perdas no cabeamento CC	0,41%	Perdas por LID	1,8%
Perdas no cabeamento CA	1,11%	Descasamento elétrico em cada string	1,5%
Sujidade	0,00%	Perdas por IAM	bo = 0,05

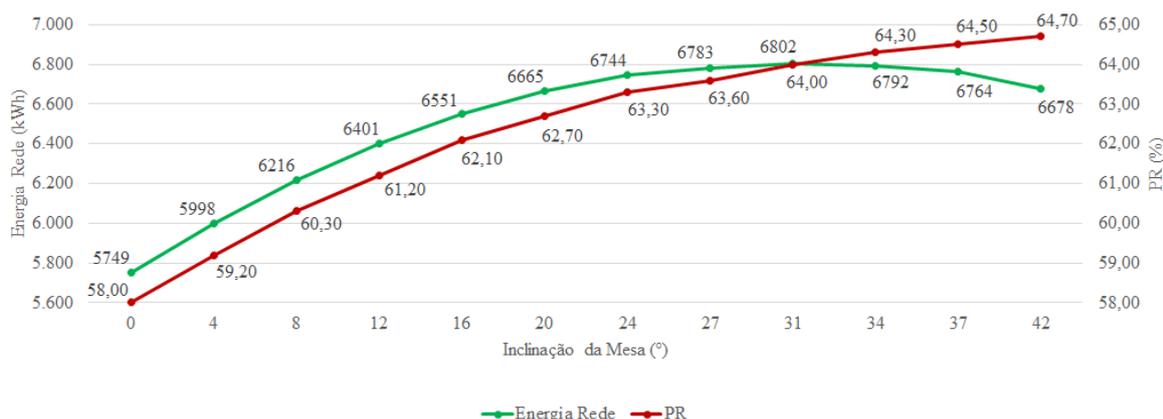


Figura 5 – Energia injetada na rede elétrica e PR em função do ângulo de inclinação adotado.

4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS, SENSORES E INSTRUMENTOS ADOTADOS

O sistema de aquisição de dados utiliza dois *dataloggers*, sendo o primeiro utilizado para monitorar o SFE e o segundo monitora os sensores de um sistema para medição do recurso solar (SMRS) na região (estação solarimétrica).

A estação está instalada no alto da laje do edifício da Engenharia Elétrica, com 17 m de altura, também localizado no campus da capital, na zona oeste de São Paulo, a menos de 200 m do local de instalação do SFE, nas coordenadas 23°33'27,50"S; 46°43'50,46"O.

O local de instalação foi escolhido de modo que este fosse livre de sombreamento ($< 5^\circ$) e apresentasse a menor interferência possível nas medições de temperatura do ar, umidade, pressão barométrica, velocidade do vento, direção do vento e precipitação, além de possuir fácil acesso para os pesquisadores e a equipe de manutenção e/ou instalação.

Os arredores da área onde estão instalados o SFE e o SMRS é classificado como pertencente à classe 6 (uso misto com grandes edifícios em paisagem aberta como hospitais, universidades e aeroportos) pelo critério de arranjo de formas urbanas de Oke (2007), e também classificado como pertencente a classe 7 (planando) segundo a classificação de terreno de Davenport et. al. (1960 e 2000), sendo estas classificações adotadas pela WMO (2014).

Ambos os sistemas utilizam um *datalogger* Campbell Scientific da família CR1000 para o gerenciamento da aquisição de dados, sendo adotado o modelo CR1000X no SFE e o modelo CR1000 no SMRS. Todos os *dataloggers* estão conectados ao sistema de coleta de dados (servidor), utilizando uma interface de comunicação por Wi-Fi (Campbell Scientific NL240) conectada a rede LAN do CITI-USP, onde cada *datalogger* recebeu um endereço de IP e nome de designação únicos.

Cada *datalogger* possui um sistema de alimentação ininterrupta constituído por uma fonte CA/CC de 12V alimentada pela rede elétrica, com possibilidade de redundância de alimentação através de um módulo fotovoltaico dedicado, conectado a uma bateria selada de chumbo-ácido com 12 V de tensão e capacidade de 35 Ah, proporcionando ao menos 3 dias consecutivos de autonomia para o SFE e 10 dias de autonomia para o SMRS.

A Fig. 6 mostra os principais componentes do sistema de aquisição utilizados no SMRS, e a Fig. 7 ilustra os componentes do sistema de aquisição adotados no SFE, sendo os parâmetros para cada sensor e equipamento mostrados na Tab. 3.

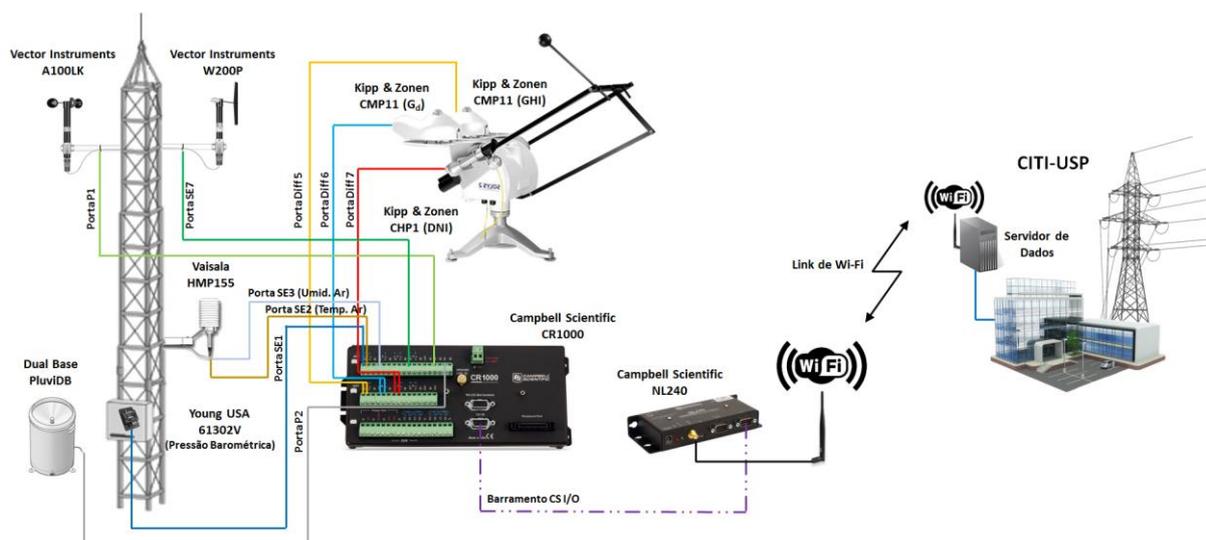


Figura 6 – Diagrama de sensores e equipamentos do SMRS.

Tabela 3 – Parâmetros monitorados, fabricante e modelo, a acurácia, resolução e escala, quantidade utilizada, o sistema ao qual pertencem e a classe ao qual atendem na IEC 61724-1 para cada sensor utilizado.

PARÂMETRO	DISPOSITIVO	ACURÁCIA	RESOLUÇÃO	ESCALA	QUANT	CLASSE
Irradiância						
Irradiância no Plano Inclinado (POA)	Kipp & Zonen RT1 (Fotodiodo)	Classe Secundária da ISO 9060	1,000000 W/m ²	0 a 1500 W/m ²	3 (SFE)	Classe C
Irradiância Global Horizontal	Kipp & Zonen CMP11 (Termopilha)	Padrão Secundário da ISO 9060	0,659287 W/m ²	0 a 2699,78 W/m ²	1 (SMRS)	Classe A
Irradiância Difusa	Kipp & Zonen CMP11 (Termopilha)	Padrão Secundário da ISO 9060	0,724200 W/m ²	0 a 2965,60 W/m ²	1 (SMRS)	Classe A
Irradiância Normal	Kipp & Zonen CHP1 (Termopilha)	Classe Primária da ISO 9060	0,700115 W/m ²	0 a 2866,97 W/m ²	1 (SMRS)	Classe A
Fatores Ambientais						
Temperatura do Módulo Fotovoltaico	Campbell Scientific 110PV (Termistor)	≤ ± 1,0 °C	0,000018 °C	-40 a 135 °C	2 (SFE)	Classe A
	Kipp & Zonen RT1 (Termistor)	± 1,0 °C	0,1 °C	-40 a 100 °C	3 (SFE)	Classe A
Temperatura do Ar (Bulbo Seco)	Campbell Scientific EE181	≤ ± 0,5 °C	0,000042 °C	-40 a 60 °C	1 (SFE)	Classe A
	Vaisala HMP155	≤ ± 0,45 °C	0,085470 °C	-80 a 60 °C	1 (SMRS)	Classe A
Umidade do Ar	Campbell Scientific EE181	≤ ± 0,5 °C	0,000030%	0 a 100%	1 (SFE)	- ⁽³⁾
	Vaisala HMP155	≤ ± 0,4 °C	0,061050%	0 a 100%	1 (SMRS)	- ⁽³⁾
Velocidade do Vento	R. M. Young USA 03101	± 0,5 m/s	0,75 m/s	0 a 50 m/s	1 (SFE)	Classe A
	Vector Instruments A100LK	± 1,0% ± 0,1 m/s	0,0499 m/s	0 a 77,22 m/s	1 (SMRS)	Classe A
Direção do Vento	Vector Instruments W200P	± 3°	0,087179°	0 a 357°	1 (SMRS)	- ⁽³⁾
Razão de Sujidade	Kipp & Zonen DustIQ	± 1,0% ± 0,1	0,1%	0 a 50%	3 (SFE)	Classe A
Precipitação de Chuva	Dual Base PluviDB	≤ ± 3,0%	0,2 mm	0 a 500 mm/h	1 (SMRS)	Classe A
Parâmetros Elétricos						
Tensão do Array CC		± 3,0%	0,01 V	0 a 600 V		- ⁽³⁾
Corrente do Array CC		± 3,0%	0,01 A	0 a 12,5 A		- ⁽³⁾
Potência do Array CC		± 3,0%	0,001 W	0 a 2640 W		- ⁽³⁾
Tensão de Saída CA	ABB UNO 2.0 TL-OUTD-S	± 3,0%	0,01 V	0 a 264 V	3 (SFE)	Classe B
Corrente de Saída CA		± 3,0%	0,01 A	0 a 12 A		Classe B
Potência de Saída CA		± 3,0%	0,001 W	0 a 2400 W		Classe B
Energia Injetada CA		± 6,9%	0,001 kWh	-		- ⁽⁴⁾
Fator de Potência Injetado		± 3,0%	0,001	0,0 a 1,0 (-) cap. / (+) ind.		- ⁽⁴⁾

Os sensores de temperatura de contato para módulos fotovoltaicos Kipp & Zonen RT1 estão localizados no módulo central da fileira superior de cada mesa e os sensores Campbell Scientific 110PV estão instalados somente na mesa 2, fixados no módulo central de cada uma de ambas as fileiras, conforme o anexo B da IEC 61724-1.

O anemômetro de concha foi instalado o mais próximo possível das mesas, sendo instalado na parte traseira da mesa 2 a uma altura fixa de 2,5 m, de modo a evitar que provocasse sombreamento sobre o sistema. Apesar da IEC 61724-1 recomendar que o anemômetro seja instalado numa altura que represente as condições do vento na altura das mesas, estas possuem ajuste de ângulo de 0° a 42°, podendo a parte mais alta da mesa ficar entre 1,33 m à 2,00 m de altura do chão (Fig. 2c). De modo a garantir que as medidas da velocidade do vento nas mesas sofram o mínimo possível de interferência da turbulência do ar provocada pelo próprio obstáculo que elas representam, optou-se por instalar o anemômetro de concha a uma altura de 2,5 m.

E por último, o sensor de temperatura do ar e umidade relativa (Campbell Scientific EE181) foi instalado a pelo menos 1 m de distância dos módulos fotovoltaicos ou quaisquer outras fontes de calor, tendo sido posicionado a uma altura de 1,5m do chão (AASC, 1985 e WMO, 2014), conforme mostrado na Fig. 2c.

³Dispositivo não classificado pelo fato da IEC 61724-1 não exigir o monitoramento em campo ou a realização de estimativas deste parâmetro para a localidade, ou, por apenas a classe A exigir o seu monitoramento no local ou o dispositivo avaliado não atender aos requisitos solicitados.

⁴Não atende a IEC 61724-1 pois não há instalado um multimetro de energia com TCs da classe 0,2s (Classe A), classe 0,5s (Classe B) ou classe 2 (Classe C) na entrada do quadro de energia no edifício do CITI-USP, no ponto de conexão do SFE.

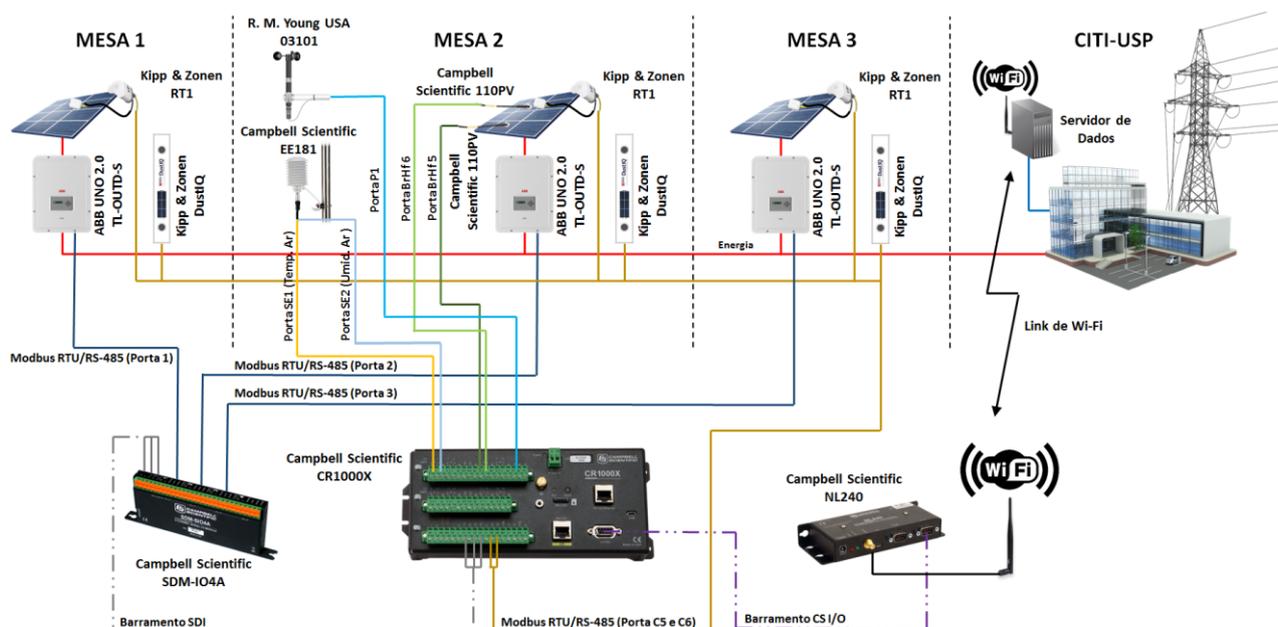


Figura 7 - Diagrama de sensores e equipamentos do SFE.

5. COLETA DE DADOS E INTERFACE DE MONITORAMENTO

Os componentes descritos anteriormente integram-se para permitir a coleta de dados destes dois sistemas independentes, separados entre si por quase 200 m de distância, de maneira eficiente para o servidor de armazenamento de dados no edifício do CITI-USP. Desta forma, os dados de instrumentos ou sensores são requisitados (digital) ou amostrados (analógico) pelo seu respectivo *datalogger* e posteriormente são transmitidos através de links Wi-Fi independentes para a rede LAN, para serem armazenados no servidor a cada 1 minuto.

A programação de cada *datalogger*, a configuração dos dispositivos e sensores, a configuração de agendamento de coleta de dados e a transferência de dados propriamente dita são realizadas pela suíte do *software* LoggerNet da Campbell Scientific. Sua utilização é recomendada pelo fabricante, em sistemas de aquisição e monitoramento distribuídos que necessitam de transferência agendada de dados e/ou reconfigurações constantes de dispositivos como o(s) *datalogger(s)*, por exemplo.

A programação dos ciclos de controle e aquisição para cada *datalogger* foi realizada através da linguagem CRBasic, sendo que para o SMRS o tempo de amostragem adotado é de 1 segundo, enquanto, para o empregado no SFE é de 5 segundos, com um intervalo de armazenamento dos dados de 1 minuto para ambos os sistemas.

O período de amostragem do SMRS e do SFE, atende os requisitos da classe A e B, respectivamente. Isso se deve a maneira como é permitido o acesso aos endereços de memória Modbus dos inversores, sendo que para cada um dos três inversores é necessário realizar 3 requisições de dados distintas por período de amostragem, onde cada requisição demora entre 150 a 200 ms para ser atendida pelo inversor.

Dado a arquitetura do SFE, são necessários entre 1350 ms até 1800 ms somente para obter todos os dados requisitados aos três inversores (medições de parâmetros elétricos, estatísticas de produção de energia, além de alarmes e status de operação), sendo possível com a otimização do código CRBasic do *datalogger* atender à classe A, com ciclos de controle e aquisição de dados entre 2,5 a 3 s.

Os sistemas dos *dataloggers* adotam de maneira direta o valor de 00:00 para o horário da meia-noite, com o relógio interno de ambos os *dataloggers* sendo verificados diariamente, através do protocolo NTP, entre o horário da 00:00 horas até 06:00 horas, em intervalos regulares de 15 minutos até que a requisição seja bem-sucedida, com o ajuste de relógio ocorrendo quando o desvio de tempo for superior à ± 250 ms.

A interface de monitoramento do SFE foi desenvolvida com a suíte de *software* Real-Time Monitoring and Control (RTMC) Pro, também da Campbell Scientific. O *software* é capaz de exibir os dados coletados de múltiplas entradas de dados (*dataloggers* e bancos de dados), através de elementos como botões, mostradores digitais ou de ponteiros, gráficos, tabelas, alarmes e barras de ajuste. A interface, bem como dados e relatórios, também pode ser publicada através de um servidor web para o monitoramento e controle, realizados de forma remota.

Podemos observar a tela principal do monitoramento do SFE na Fig. 8, com os principais parâmetros ambientais e elétricos do SFE, e o gráfico semanal da energia injetada na rede (verde) e do PR (vermelho).

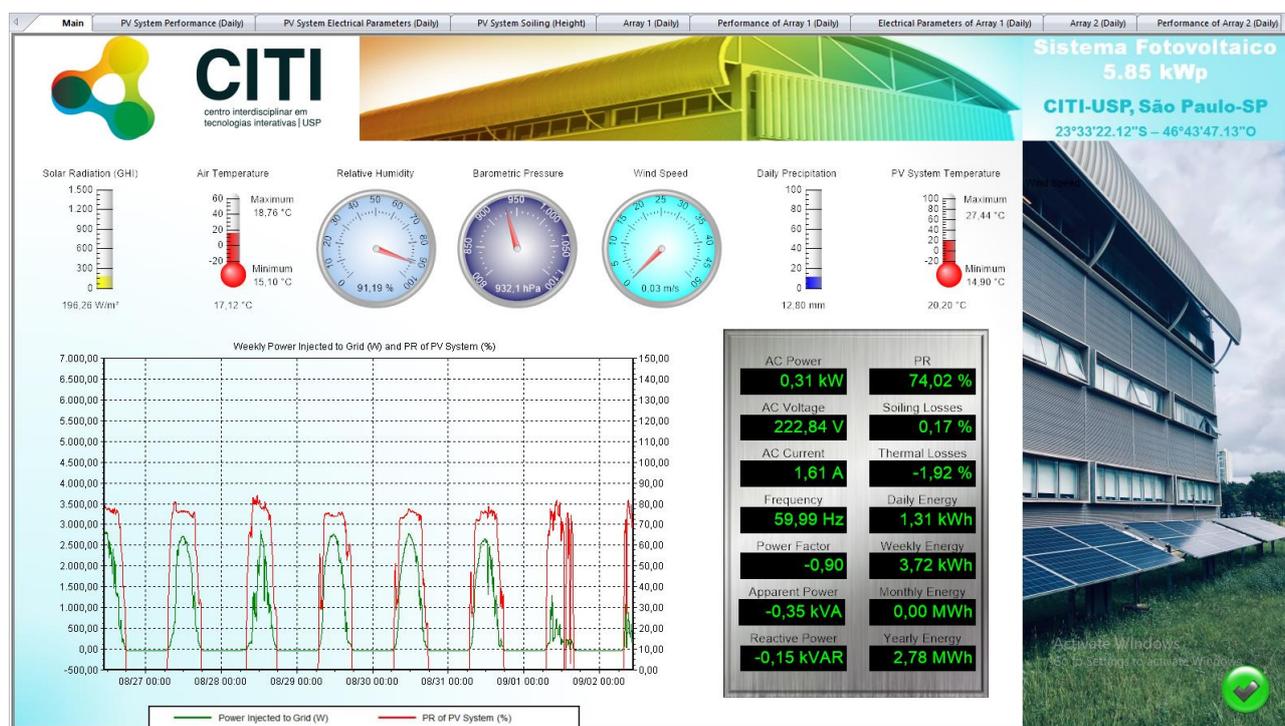


Figura 8 – Tela principal de monitoramento do SFE.

6. CONCLUSÃO

Analisando as informações apresentadas na Tab.3, é possível constatar que todas as variáveis de irradiância, exceto a irradiância POA, atendem a classe A. Isso ocorreu devido à necessidade de se monitorar cada uma das 3 mesas por causa do ajuste do ângulo de inclinação de cada uma delas, o que trouxe limitações orçamentárias que levaram a escolha do sensor Kipp & Zonen RT1, pelo seu melhor custo benefício, por possuir sensor de temperatura, erro de leitura abaixo de 7,0%, o local de instalação apresentar características de intenso sombreamento ($> 5^\circ$) com grandes interferências nas medições do sensor e, por último, o fato deste sensor ser 4 vezes mais barato que um piranômetro padrão secundário com unidade de ventilação e sensor de temperatura adicional para o módulo fotovoltaico, para atender a classe A.

As mesmas limitações orçamentárias levaram ao fato de não ser realizado o monitoramento no local da direção do vento, dos parâmetros elétricos para cada inversor, bem como da energia e do fator de potência no ponto de conexão do SFE no quadro de entrada, sendo que a expectativa dos custos de investimento para instalar um sistema de monitoramento classe A externo aos inversores, com unidades de monitoramento de *strings*, multimedidores de energia e TCs para classe de precisão e acurácia descritas na IEC 61724-1, dentro da seção 7.5, podem rapidamente ultrapassar, ou mesmo dobrar os valores investidos nos próprios inversores.

Entretanto, podemos ponderar que o parâmetro de irradiância POA cumpre os requisitos da classe B, pois é permitido pela norma que ele seja estimado para SFs desta classe, conforme a Tab. 1.

Conforme descrito acima, podemos concluir que esta técnica é a mais adequada para obtenção do parâmetro de irradiância POA, dadas as características de intenso sombreamento no local de instalação do SFE. Já os dados do sensor Kipp & Zonen RT1, são utilizados para refinar a estimativa do parâmetro de irradiância POA nos horários livres de sombreamento, além de serem utilizados para a realização de medições deste tipo de perdas no SFE.

Como o SMRS possui sensores que atendem plenamente aos requisitos da classe A para as variáveis de irradiância global, difusa e direta, sendo possível estimar a irradiância POA, para quaisquer ângulos de inclinação das 3 mesas do SFE, através de modelos matemáticos como o de Perez, por exemplo.

Desta maneira, é possível classificarmos o SFE dentro da classe B, exceto para os parâmetros de energia injetada CA e o seu fator de potência, pois há imprecisão nas medidas por não ter sido instalado um multimetedor com TCs de classe 0,5S no ponto de conexão do SFE na entrada de energia do edifício. Por se tratar de um sistema com múltiplos inversores e a norma exigir que a medição destes parâmetros seja realizada desta maneira, está sendo providenciada a aquisição e instalação destes equipamentos, de modo que o SFE possa atender plenamente aos requisitos de um sistema da classe B da IEC 61724-1.

Outro aspecto importante além da acurácia, resolução e escala do inversor, é avaliar a maneira como é executado o acesso aos seus endereços de memória Modbus, bem como o seu tempo de resposta às requisições.

Para atender ao requisito de ciclos de aquisição de 1 s (classe A) em sistemas com múltiplos inversores, estes devem ser capazes de fornecer todos os dados a serem monitorados em apenas uma requisição, num intervalo de aproximadamente 50 ms preferencialmente. Desse modo, seria possível obter uma boa relação entre inversores,

equipamentos e sensores monitorados por *datalogger*, além de um melhor custo benefício entre o valor investido no sistema de monitoramento da classe A em relação ao custo de instalação do SF propriamente dito.

Dado o objetivo do estudo ou pesquisa científica a ser realizada, é sempre importante avaliar se o impacto que a redução na acurácia das variáveis monitoradas entre os sistemas da classe A e B, podem de fato, comprometer ou impactar o estudo a ser desenvolvido, para assim justificar os custos inerentes a sua instalação e/ou adequação.

Portanto, considerando que os SFs da classe B são indicados para a avaliação básica de desempenho e análises de perdas do sistema, conforme a IEC 61724-1, podemos constatar que o SFE do CITI-USP possui as características necessárias para a realização de pesquisas científicas em energia fotovoltaica, como por exemplo, caracterização de sujidade (*Soiling*), avaliação de novos dispositivos de monitoramento e otimização do desempenho de SFs, além de novas técnicas e algoritmos para tratamento e análise através de inteligência artificial, por exemplo.

Agradecimentos

O SFE de 5,85 kWp, bem como seu monitoramento e sensoriamento dos parâmetros ambientais, foi possível graças ao suporte da Companhia Energética de São Paulo (CESP), a Campbell Scientific do Brasil, ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e ao Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico (LSI-TEC), código PE-0061-0034/2011 da Chamada 13/2011 da ANEEL.

REFERÊNCIAS

- AASC, 1985. The State Climatologist. Publication of the American Association of State Climatologists: Heights and Exposure Standards for Sensors on Automated Weather Stations, vol. 9, No. 4.
- CEU, 1997. “Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants” Photovoltaic System Monitoring, Documents A, Photovoltaic System Monitoring & Document B, Analysis and Presentation of Monitoring Data. Commission of the European Union, Joint Research Centre, ESTI, Ispra, Italy, Version 4.3.
- Davenport, A. G., 1960. Rationale for determining design wind velocities. Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, vol. 86, pp. 39-68.
- Davenport, A. G., Grimmond, C. S. B., Oke, T. R. and Wieringa, J., 2000. Estimating the roughness of cities and sheltered country. Preprints of the Twelfth American Meteorological Society Conference on Applied Climatology. Asheville, NC, United States, pp. 96-99.
- IEC, 2017. “Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring” IEC 61724-1. International Electrotechnical Commission, ed. 1.0.
- NREL, 2011. “Monitoring System Performance” National Renewable Energy Laboratory. PV Module Reliability Workshop. 16 Feb. 2011 – NREL/PR-5200-50643. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50643.pdf>
- Oke, T. R., 2007. Siting and Exposure of Meteorological Instruments at Urban Sites. In: Borrego C., Norman AL. (eds) Air Pollution Modeling and Its Application XVII. Springer, Boston, MA.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de Eng. para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, CEPEL - CRESESB.
- Wieringa, J., 1980. Representativeness of wind observations at airports. BAMS, vol. 61, pp. 962-971.
- WMO, 2014. Guide to Instruments and Methods of Observation. World Meteorological Organization. No. 8, 18th ed.
- Zomer, C., Nobre, A., Cassatella, P., Reindl, T., Rütther, R., 2014. The balance between aesthetics and performance in building-integrated photovoltaics in the tropics. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.

PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR SCIENTIFIC RESEARCH AND ITS CLASSIFICATION ACCORDING TO IEC 61724-1

Abstract. *Monitoring of R&D photovoltaic systems usually represents large investments in relation to the value of the system, especially when it is a microgeneration. However, there aren't still much information about R&D photovoltaic systems in comply with the monitoring requirements proposed by the IEC 61724-1, and, (about) the kind of scientific research that can be performed given the characteristics of the monitoring system adopted. This paper describes the installation of monitoring system for a 5.85 kWp photovoltaic system located at CITI-USP, despite the fact that to categorize it according to the standard, showing your potential for scientific research, despite the fact that the system does not fully meet the most appropriate class (for this purpose). Through a careful analysis of the installation site, the photovoltaic system and the evaluation of the guidelines established in the standard, the main criteria that should be observed in the selection and installation of sensors and equipment were raised, as well as the aspects that should be considered in the development of the data acquisition and monitoring system. It was found that the installed monitoring system can be classified predominantly like a class B, according to the IEC 61724-1, where the main considerations for selecting sensors and equipment were reported, as well as the development of data acquisition systems and of the monitoring interface.*

Key words: *Monitoring, IEC 61724, PV System*