

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM NOVO HAMBURGO
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA EM ENERGIA**

CAMILA MARISTELA ANTONIOLLI

**DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA DA UERGS - CAMPUS CENTRAL
E ANÁLISE E QUALIFICAÇÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR OBTIDOS**

NOVO HAMBURGO

2018

CAMILA MARISTELA ANTONIOLLI

**DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA DA UERGS - CAMPUS CENTRAL
E ANÁLISE E QUALIFICAÇÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR OBTIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia em Energia na
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Haag

NOVO HAMBURGO

2018

Catálogo de Publicação na Fonte

V632d

Antoniolli, Camila Maristela

Descrição da estação Solarimétrica da UERGS – Campus Central e análise e qualificação dos dados de radiação solar obtidos- UERGS / Camila Maristela Antoniolli. – Novo Hamburgo, 2018.

64 f.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Haag

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia em Energia, Unidade de Novo Hamburgo, 2018.

1. Medições de radiação solar. 2. Estação Solarimétrica. 3. Modelo de simulação 4. Trabalho de Conclusão de Curso. I. Rafael Haag. II. Título.

CAMILA MARISTELA ANTONIOLLI

**DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA DA UERGS - CAMPUS CENTRAL
E ANÁLISE E QUALIFICAÇÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR OBTIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia em Energia na
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Haag

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Rafael Haag
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

**NOVO HAMBURGO
2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Haag pela paciência e conhecimento compartilhado.

Aos meus familiares e namorado pelo apoio emocional ao longo da trajetória de desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é importante para muitas áreas de pesquisa e aplicações. Medições de radiação solar têm se tornado cada vez mais importantes devido à crescente demanda por dados com maior precisão e maiores resoluções temporais e espaciais. A medição da radiação solar envolve diversas grandezas e diferentes instrumentos, podendo ser medida com a ajuda de sistemas de medições solares conhecidas como estações solarimétricas. Tendo em vista esse cenário, este trabalho descreve uma estação solarimétrica instalada nas dependências da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e os instrumentos que a compõe, e analisa o seu local de instalação. Os dados de irradiação global horizontal medidos pela estação são analisados e comparados aos dados simulados pelo modelo computacional de irradiância solar espectral SMARTS2.

Palavras-Chave: Medições de radiação solar; Estação solarimétrica; Modelo de simulação

ABSTRACT

The solar radiation that reaches the Earth's surface is important for many areas of research and applications. Solar radiation measurements have become increasingly important due to a growing demand for more accurate data and higher temporal and spatial resolutions. Measurement of solar radiation involves various quantities and different instruments, and it can be measured with the aid of solar measurement systems known as solar monitoring stations. Considering this scenario, this work describes a solar monitoring station located at the State University of Rio Grande do Sul, and the instruments that are part of it, and also analyzes its location. The global horizontal irradiance data measured by the station is analyzed and compared to the data simulated by the spectral solar irradiance model SMARTS2.

Keywords: Solar radiation measurements; Solar monitoring station; Simulation model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes da radiação solar	5
Figura 2 - Massa de ar, constituintes atmosféricos e componentes da radiação	6
Figura 3 - Esquema de montagem de um piranômetro com esfera de sombreamento	7
Figura 4 - Piranômetro do tipo preto e branco (black and white) Eppley 8-48.....	8
Figura 5 - Piranômetro com sensor enegrecido modelo Eppley PSP	8
Figura 6 - Piranômetro termoelétrico (superior direito), piranômetro com sensor fotoelétrico e célula de referência fotovoltaica de silício (canto inferior esquerdo)	9
Figura 7 - Posição geográfica da estação.....	18
Figura 8 - Local de instalação da estação solarimétrica	19
Figura 9 - Piranômetro modelo MS-410	20
Figura 10 - Piranômetro modelo MS-56 montado em um rastreador solar.....	21
Figura 11 - Rastreador solar e esfera de sombreamento.....	23
Figura 12 - Sensor de irradiação solar de silício	24
Figura 13 – Anemômetro Thies Compact S12100H	25
Figura 14 – Anemoscópio Thies Compact TMR	26
Figura 15 - Sensor de pressão barométrica.....	27
Figura 16 - Pluviômetro modelo Young 52250.....	28
Figura 17 - Termo-higrômetro e capa protetora	29
Figura 18 - Datalogger Ammonit Meteo-40.....	30
Figura 19 - Obstrução causada por construção ao sul da estação.....	34
Figura 20 - Bloqueio de radiação incidente causado por árvores.....	34
Figura 21 – Representação gráfica da irradiação global horizontal medida e simulada	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades referentes ao Sol	4
Tabela 2 - Características dos piranômetros operacionais.....	10
Tabela 3 - Características dos pireliômetros operacionais	12
Tabela 4 - Classificação das estações solarimétricas.....	15
Tabela 5 - Precisão mínima para estações de alta precisão (ISO 9060).....	16
Tabela 6 - Localização geográfica da estação	18
Tabela 7 - Disposição dos piranômetros instalados	19
Tabela 8 - Características operacionais do MS-410	20
Tabela 9 - Características operacionais do MS-56	21
Tabela 10 - Características operacionais do sensor Si-V-10TC.....	24
Tabela 11 - Características operacionais do Compact S12100H.....	25
Tabela 12 - Características operacionais do Compact S12100H.....	27
Tabela 13 - Características operacionais do sensor Ammonit AB 60	28
Tabela 14 - Características operacionais do sensor de precipitação Young 52250.....	29
Tabela 15 - Características operacionais do termo-higrômetro KP S52100	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos Específicos	2
1.2 Objetivos Específicos	2
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	3
2.1 Radiação Solar	3
2.1.1 O Sol.....	3
2.1.2 Radiação solar na Terra.....	5
2.2 Instrumentos de medição da radiação	6
2.2.1 Piranômetro	6
2.2.2 Pireliômetro	12
2.3 Medições Meteorológicas	14
2.2 Classificação das estações solarimétricas.....	15
2.3 Localização das estações de medições	16
2.3.1 Recomendações gerais	16
3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA	18
3.1 Localização	18
3.2 Descrição dos elementos que compõem a estação	19
3.2.1 Piranômetro	19
3.2.2 Pireliômetro	21
3.2.3. Rastreador solar e esfera de sombreamento	22
3.2.4 Sensor de irradiação solar de silício.....	23
3.2.5 Anemômetro.....	25
3.2.6 Anemoscópio.....	26
3.2.7 Barômetro.....	27
3.2.8 Pluviômetro	28
3.2.9 Termo-higrômetro	29
3.2.10 Datalogger	30
3.2.11. Outros equipamentos.....	31
4. MODELO COMPUTACIONAL DE IRRADIÂNCIA SOLAR ESPECTRAL: SMARTS2	32
5. ANÁLISE DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA	34
6. COMPARATIVO ENTRE AS TRAJETÓRIAS DA IRRADIAÇÃO MEDIDA E SIMULADA ...	36
6. CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

Os humanos estudam o sol e aplicam seu entendimento para melhorar suas vidas desde os primórdios da história Vignola et. al. (2012). Construções são projetadas para aproveitar a radiação solar para iluminação natural e aquecimento desde a Grécia Antiga. A energia proveniente do sol não tem custos e está disponível para todos, e as tecnologias que transformam irradiação solar em energia utilizável estão cada vez mais baratas à medida que a indústria solar cresce e a produção aumenta.

As medições de radiação solar têm se tornado cada vez mais importantes devido à crescente demanda por dados com maior precisão e maiores resoluções temporais e espaciais.

Segundo o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) ou Laboratório Nacional de Energia Renovável do Departamento de Energia dos Estados Unidos, com sistemas de energia solar, como com qualquer outra fonte de geração, o conhecimento da confiabilidade e qualidade futura do combustível é essencial para análises de desempenho do sistema e viabilidade financeira do projeto. A variabilidade do fornecimento de luz solar é o principal e a maior incerteza no desempenho previsto de uma usina de energia solar. Desta forma, quanto melhor a informação disponível, mais precisa será a estimativa de desempenho do projeto, reduzindo riscos e incertezas para os investidores. Um aumento de 1 a 2% de eficiência pode significar uma grande redução de custos (VIGNOLA et. al., 2012).

A medição da radiação solar envolve diversas grandezas e diferentes instrumentos, podendo ser medida com a ajuda de sistemas de medições solares (estações solarimétricas), que além das medições relacionadas à própria radiação solar, podem monitorar outros parâmetros que influenciam a produção de energia solar, como velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, precipitação, humidade relativa e pressão atmosférica.

Nesse contexto, este trabalho aborda inicialmente os aspectos fundamentais da dinâmica do Sol para possibilitar o entendimento dos fatores que definem a incidência da radiação solar na superfície terrestre e seus componentes. Descreve também os sensores de irradiância solar e seu funcionamento, enquanto fornece uma descrição do tipo de radiação solar que eles são projetados para medir.

O corpo principal deste trabalho, entretanto, caracteriza a Estação Solarimétrica – UFRGS Campus Central, descreve os instrumentos que a compõe e sua operação, e analisa o local escolhido para a sua instalação.

Por fim, usando os dados modelados para um dia de céu limpo, o trabalho apresenta uma simulação com o modelo computacional de irradiância solar espectral SMARTS2 para obtenção da irradiação global horizontal, e a comparação entre a irradiação prevista pelo modelo e a medida pela estação.

1.1 Objetivos Específicos

Descrever a Estação Solarimétrica instalada na UERGS – Campus central, seus instrumentos e outros aspectos fundamentais relacionados à sua localização e operação.

1.2 Objetivos Específicos

- Descrever os elementos que compõem a Estação Solarimétrica Uergs – Campus Central
- Analisar o local onde a estação está posicionada.
- Simular a trajetória da irradiância global horizontal usando modelo computacional.
- Comparar a irradiação global horizontal medida pela estação solarimétrica e a irradiação obtida por simulação.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Radiação Solar

A radiação solar é a radiação eletromagnética que se propaga no vácuo e se move na forma de ondas eletromagnéticas, com frequências e comprimentos diferentes. Essas ondas resultam da liberação de energia das reações químicas que acontecem no sol (VIGNOLA et. al., 2012).

A radiação solar corresponde ao fluxo de energia que incide sobre um determinado corpo e é expressado em forma de potência por unidade de área (geralmente watts por metro quadrado).

Para evitar problemas de interpretação dos conceitos abordados neste trabalho, é importante definir alguns termos referentes à energia solar. Desta forma, com base no texto da NBR 10899: Energia fotovoltaica – Terminologia, define-se:

- I. Radiação solar: forma de transferência de energia advinda do sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas.
- II. Irradiância solar: taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watts por metro quadrado (W/m^2).
- III. Irradiação solar: Irradiância solar, integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente 1 hora ou um dia, medida em watts-hora por metro quadrado (Wh/m^2) ou joules por metro quadrado (J/m^2).

Entretanto, alguns autores usam o termo radiação expresso em W/m^2 , o que pode ser visto em algumas tabelas adaptadas. Em casos como este, procurou-se respeitar os termos utilizados pelos autores referenciados.

2.1.1 O Sol

O sol é considerado uma estrela de tamanho médio, menor que diversas outras estrelas. A fusão nuclear dentro de seu interior alimenta o sol à medida que hidrogênio se combina para formar o hélio. O que impede que o sol se desfaça é a gravidade, e o ciclo de fusão nuclear é o que mantém o sol irradiando energia para o espaço a uma taxa considerada constante (VIGNOLA et. al., 2012).

Esfera com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e a uma distância média da Terra de $1,5 \times 10^{11}$ m, o sol possui uma temperatura efetiva que atinge 5777 K (aproximadamente 5500° C), com o comportamento semelhante a um corpo negro. A temperatura efetiva é calculada em função da temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido ou umidade relativa do ar e velocidade do ar, ou seja, temperatura de sensação térmica. (DUFFIE, 2013). A Tabela 1 mostra as principais propriedades referentes ao Sol.

Tabela 1 - Propriedades referentes ao Sol

Propriedade	Valor
Massa	$1,98 \times 10^{33}$ g (332.830 vezes a da Terra)
Raio equatorial	$6,96 \times 10^{10}$ cm (109 vezes o da Terra)
Densidade média	$1,41$ g/cm ³
Densidade central	160 g/cm ³
Idade aproximada	$4,5 \times 10^9$ anos
Distância média da Terra	$1,495 \times 10^{11}$ m ($\pm 1,7\%$)
Temperatura central	$1,5 \times 10^7$ K
Temperatura efetiva (fotosfera)	5777 K
Luminosidade	$3,827 \times 10^{33}$ ergs/seg
Composição química	Hidrogênio - 92,1%. Hélio - 7,8%. Oxigênio - 0,061%. Carbono - 0,030%. Nitrogênio - 0,0084%. Néon - 0,0076%. Ferro - 0,0037%. Silício - 0,0031%. Magnésio - 0,0024%. Enxofre 0,0015%. Todos os restantes - 0,0015%

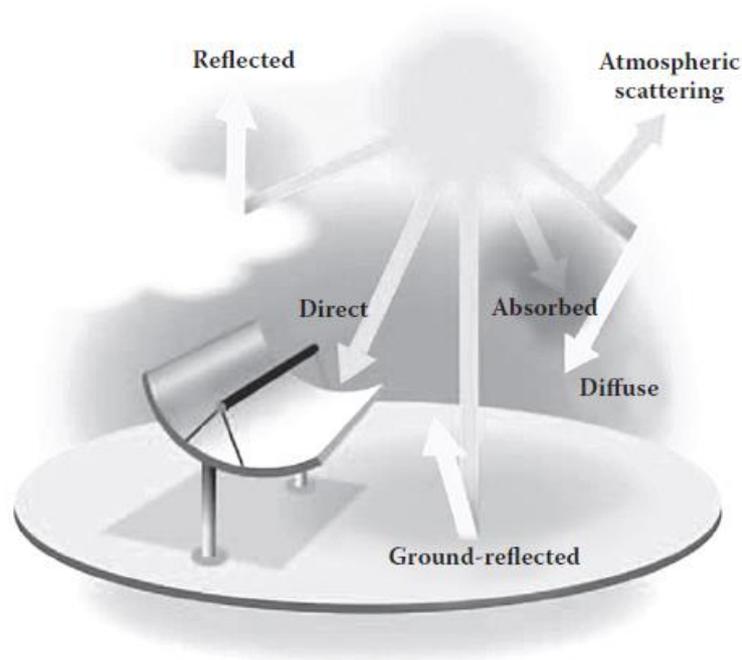
Fonte: ROSA, 2003

A radiação emitida pelo sol e sua relação espacial com a terra resultam em uma intensidade quase fixa de radiação solar fora da atmosfera da Terra. Essa radiação constante denomina-se constante solar, G_{sc} , e é definida como sendo a energia do sol por unidade de tempo recebida em uma área unitária de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação na distância média terra-sol fora da atmosfera. Duffie (2013), adota 1367 W/m² como valor desta constante, mesmo valor considerado pelo *The World Radiation Center* (WRC).

2.1.2 Radiação solar na Terra

A Terra intercepta apenas uma pequena fração da energia irradiada pelo sol. A radiação solar que se propaga através da atmosfera é atenuada pela absorção e dispersão. Várias moléculas na atmosfera, em particular vapor de água e partículas suspensas ou transportadas pelo ar influenciam esses processos. Esses elementos atmosféricos decompõem a radiação solar em constituintes conhecidos como componentes de radiação solar (MYERS, 2013).

Figura 1 - Componentes da radiação solar



Fonte: Myers, 2013.

A fração da radiação solar em um plano horizontal ou inclinado que não sofre qualquer alteração em sua direção original é denominada radiação solar direta (*beam radiation*).

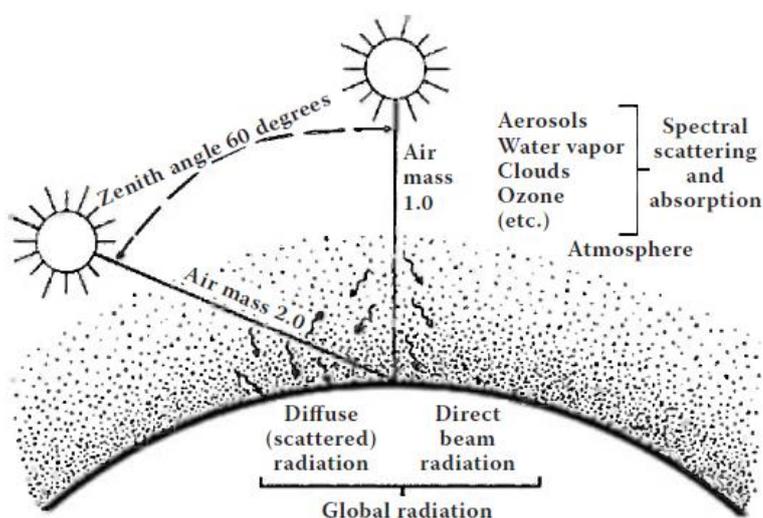
A radiação difusa (*diffuse radiation*) refere-se à componente da irradiação solar que, ao atravessar a atmosfera, tem sua direção alterada por espalhamento por elementos que constituem a atmosfera (*atmospheric scattering*).

A radiação hemisférica total em um plano, também denominada global, é a soma da radiação solar direta e difusa.

Uma outra fração da radiação que chega à superfície é refletida pelo solo e refletida de volta ao solo pela atmosfera. Essa radiação refletida é uma componente da radiação difusa, e completa a radiação hemisférica total ou global. O índice de reflexão é denominado albedo.

A magnitude relativa desses componentes é uma função do caminho percorrido pela radiação direta ao passar pela atmosfera. Por sua vez, essa trajetória é uma função da posição do sol no céu e das relações geométricas entre o plano de interesse e o sol. Desta forma, pode-se definir “massa de ar” (AM) como a espessura da camada atmosférica, que está relacionada com o ângulo de zênite e com a variação da radiação solar (MYERS, 2013).

Figura 2 - Massa de ar, constituintes atmosféricos e componentes da radiação



Fonte: Myers, 2013.

2.2 Instrumentos de medição da radiação

Os instrumentos usados para medir as formas de radiação são denominados radiômetros. Neste trabalho estão resumidos os principais tipos de radiômetros usados para medir os recursos de radiação solar.

2.2.1 Piranômetro

A *World Meteorological Organization* (WMO) ou Organização Mundial de Meteorologia, é uma organização intergovernamental pertencente às Nações Unidas, e em seu guia (*Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*) descreve o

piranômetro como o instrumento necessário para medir a radiação solar global sobre o plano horizontal, que ao ser posicionado horizontalmente, detecta a luz proveniente de todas as direções. Quando na posição invertida, o piranômetro é usado para medir a radiação global refletida. Ao medir a componente difusa, a componente solar direta é bloqueada por um dispositivo de sombreamento posicionado entre o sol e o sensor do piranômetro.

Figura 3 - Esquema de montagem de um piranômetro com esfera de sombreamento



Fonte: Elaboração própria

Os principais tipos de piranômetros usam elementos termoeletrônicos ou fotoeletrônicos como sensores.

O piranômetro termoeletrico possui como sensor de radiação uma termopilha, formada basicamente por termopares em série e protegida por cúpulas hemisféricas de vidro ou quartzo. Neste dispositivo as junções quentes estão em contato com a superfície plana, preta e absorvente apontando para cima e as junções de referência frias estão sombreadas, de forma a apontar para baixo. Com a incidência da radiação cria-se uma diferença de temperatura entre o interior da cúpula e a temperatura ambiente na superfície, provocando uma diferença de potencial proporcional à medida de radiação solar. (MYERS, 2013).

Os piranômetros termoeletricos mais comuns são essencialmente de dois tipos:

- I. Black and White: possui detector pintado de branco e preto, ou seja, apresenta superfícies brancas e pretas dispostas alternativamente, em formato de coroas circulares concêntricas ou quadriculados. Neste tipo de instrumento, as juntas

quentes estão em contato com as superfícies negras e as frias estão em contato com as superfícies brancas.

- II. Sensor com superfície totalmente enegrecida: a superfície está em contato térmico com as juntas quentes e as frias, que está associada a um bloco de metal de grande condutividade térmica e isoladas da radiação, a temperatura ambiente.

Figura 4 - Piranômetro do tipo preto e branco (black and white) Eppley 8-48



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000.

Figura 5 - Piranômetro com sensor enegrecido modelo Eppley PSP



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000.

Segundo WMO (2014), os piranômetros termoeletrônicos possuem boa precisão, dentro da faixa de 2 a 5% nas medições totais diárias, a um intervalo de confiança de 95%, para os

modelos de ótima e boa qualidade e considerando correta instalação, manutenção e calibração destes equipamentos.

Os piranômetros baseados em sensores fotovoltaicos (célula solar) são instrumentos menos precisos que os termoeletrônicos e têm algumas limitações em seu uso. Eles também são mais baratos e mais fáceis de usar. Esses sensores respondem à uma limitada parte do espectro solar e não respondem ou geram sinais proporcionais às variações nas regiões onde o detector não consegue abranger. Isso inclui variações no espectro da radiação refletida pelo solo (DUFFIE, 2013).

Figura 6 - Piranômetro termoeletrônico (superior direito), piranômetro com sensor fotoeletrônico e célula de referência fotovoltaica de silício (canto inferior esquerdo)



Fonte: MYERS, 2013.

Os piranômetros são expostos a todos os tipos de condições climáticas e devem ter um design robusto para resistir aos efeitos corrosivos do ar úmido, especialmente quando posicionados em locais próximos ao mar. O receptor deve estar hermeticamente fechado dentro da sua caixa ou então esta caixa deve ser de fácil abertura para que qualquer umidade que se condense seja facilmente removida. Nos casos em que o receptor não está permanentemente selado, um dessecador é geralmente instalado na base do instrumento (WMO, 2014).

De acordo com a ISO/TR 9901 de 1990 (*Solar Energy – Field Pyranometers – Recommended Practice for Use*), que recomenda práticas para uso de piranômetros de campo,

as propriedades destes instrumentos que ser consideradas ao avaliar a incerteza e a qualidade da medição de radiação são: sensibilidade, estabilidade, tempo de resposta, resposta cosseno, resposta ao azimute, linearidade, resposta à temperatura, offset térmico, sinal de irradiância zero e resposta espectral.

A norma ISO 9060:1990 "Energia Solar - Especificação e Classificação de Instrumentos para Medição da radiação Solar e Solar Direta Hemisférica" classifica os radiômetros como de padrão secundário, primeira classe e segunda classe, enquanto a WMO, em seu guia de instrumentos meteorológico, descreve as características destes instrumentos em três diferentes níveis de desempenho quanto à qualidade, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos piranômetros operacionais

Características	Ótima	Boa	Moderada
Tempo de resposta: tempo para alcançar 95% de resposta	< 15s	< 30s	< 60s
Zero-offset:			
Offset-A: resposta à radiação térmica líquida de 200 W/m ² , ventilada	+ 7 W/m ²	+ 15 W/m ²	+ 30 W/m ²
Offset-B: resposta à 5 K/h de mudança na temperatura ambiente	± 2 W/m ²	± 4 W/m ²	± 8 W/m ²
Resolução: menor mudança detectável	± 1 W/m ²	± 5 W/m ²	± 10 W/m ²
Estabilidade: % mudança na responsividade por ano	± 0,8%	± 1,5%	± 3%
Resposta direcional (para radiação direta): a faixa de erros causada por assumir a responsividade da incidência normal é válida para todas as direções ao medir de qualquer direção, a radiação direta cuja incidência normal de irradiância é de 1000 W/m ²	± 10 W/m ²	± 20 W/m ²	± 30 W/m ²
Não-linearidade: % desvio da responsividade a 500 W/m ² devido à qualquer mudança de irradiância de 100 a 1000 W/m ²	± 0,5%	± 1%	± 3%
Sensibilidade espectral: % desvio do produto da absorvância espectral e transmitância da média correspondente, de 300 a 3000 nm	± 2%	± 5%	± 10%
Reposta de temperatura: % erro máximo devido à mudança na temperatura ambiente dentro de um intervalo de 50K)	2%	4%	8%

(Continua)

Características	Ótima	Boa	Moderada
Resposta de inclinação: % desvio na responsividade de 0 a 90° de inclinação a uma radiação direta de 1000 W/m ²	± 0,5%	± 2%	± 5%
Incerteza alcançável (nível de confiança de 95%)			
Total por hora	3%	8%	20%
Total diário	2%	5%	10%

Fonte: Adaptado de WMO, 2014.

2.2.1.1 Calibração de piranômetros

A responsabilidade pela calibração dos instrumentos radiométricos cabe aos centros mundiais, regionais e nacionais de calibração. O *Centro de Radiação Mundial* (WRC) é responsável por manter a referência básica, e o *Grupo de Padronização Mundial* (WSG) é usado para estabelecer a *Referência Radiométrica Mundial* (WRR). Durante comparações internacionais, organizadas a cada cinco anos, os padrões dos centros regionais são comparados com o WSG, e seus fatores de calibração são ajustados ao WRR (WMO, 2014).

A calibração de um piranômetro consiste na determinação de um ou mais fatores de calibração e a dependência destes em relação às condições ambientais, entre eles: nível de radiância, inclinação do instrumento, métodos de calibração, variação temporal, radiação de onda longa para a correção do *offset* e temperatura (WMO, 2014).

Existem uma ampla variedade de métodos de calibração de piranômetros, usando o sol ou fontes de laboratório. Dentre os mais usados de acordo com a WMO pode-se citar:

- a) Por comparação com um pireliômetro padrão para a irradiação solar direta e um piranômetro sombreado calibrado para a irradiância difusa do céu;
- b) Por comparação com um pireliômetro padrão usando o sol como fonte, com um disco de sombreamento removível para o piranômetro;
- c) Com um pireliômetro padrão usando o sol como fonte e dois piranômetros para serem calibrados alternadamente medindo a radiação global e difusa;
- d) Em comparação com um piranômetro padrão usando o sol como fonte, sob outras condições naturais de exposição.

A calibração do instrumento é o que delimitará a qualidade nas medidas de radiação.

2.2.2 Pireliômetro

O pireliômetro é o instrumento necessário para medir a radiação solar direta, cujas superfícies receptoras estão dispostas de maneira normal à direção solar, o que significa que o pireliômetro deve rastrear o sol ao longo de seu movimento diurno ao longo do dia (WMO, 2014). Seu funcionamento é muito similar ao do piranômetro, por meio de termopilha.

O pireliômetro possui uma pequena abertura para a incidência dos raios solares e deve estar acoplado a um dispositivo de rastreamento ou então o seu suporte deverá permitir o ajuste rápido e suave dos ângulos de elevação e azimute de modo que esta abertura permaneça posicionada perpendicularmente à incidência da radiação solar direta. (MYERS, 2013).

Características dos pireliômetros operacionais, exceto os de padrão primário, podem ser consultadas na Tabela 3 (adaptada de WMO, 2014). De acordo com o guia de instrumentos meteorológicos da WMO, incertezas resultantes dos pireliômetros de baixo custo reduzem consideravelmente a qualidade dos dados e necessitam de rastreador solar, aumentando consideravelmente os custos. Na maioria dos casos os custos incrementais da compra de um bom pireliômetro é menor quando comparado aos gastos que se teria ao adquirir o rastreador.

Tabela 3 - Características dos pireliômetros operacionais

Características	Ótima	Boa
Tempo de resposta: tempo para alcançar 95% de resposta	< 15s	< 30s
Zero-offset: resposta à 5 K/h de mudança na temperatura ambiente	± 2 W/m ²	± 4 W/m ²
Resolução: menor mudança detectável	± 0,51 W/m ²	± 1 W/m ²
Estabilidade: % mudança na responsividade por ano	± 0,1%	± 0,5%
Não-linearidade: % desvio da responsividade a 500 W/m ² devido à qualquer mudança de irradiância de 100 a 1000 W/m ²	± 0,2%	± 0,5%
Sensibilidade espectral: % desvio do produto da absorvância espectral e transmitância da média correspondente, de 300 a 3000 nm	± 0,5%	± 1%

(Continua)

Características	Ótima	Boa
Resposta de temperatura: % erro máximo devido à mudança na temperatura ambiente dentro de um intervalo de 50K)	1%	2%
Resposta de inclinação: % desvio na responsividade de 0 a 90° de inclinação a uma radiação direta de 1000 W/m ²	± 0,2%	± 0,5%
Incerteza alcançável (nível de confiança de 95%)		
Total 1 min		
%	0,9	1,8
KJ/m ²	0,56	1
Total 1 hora		
%	0,7	1,5
KJ/m ²	21	54
Total diário		
%	0,5	1
KJ/m ²	200	400

Fonte: Adaptado de WMO, 2014.

As incertezas estimadas na Tabela 3 são baseadas supondo-se bom estado de conservação dos instrumentos, alinhados e limpos corretamente; valores de 1 minuto e 1 hora para irradiâncias de céu claro ao meio dia solar, e valores diários para dias claros em latitudes médias.

O principal erro nas medições é devido à dificuldade relacionada ao rastreamento do Sol e do ângulo de abertura do sensor. Pireliômetros de alta qualidade possuem incerteza de 0,5% considerando as medições totais diárias.

2.2.2.1 Calibração de pireliômetros

Os pireliômetros devem ser calibrados por comparação usando o sol como fonte e um pireliômetro com padrões rastreáveis ao *World Standard Group (WSG)* e incerteza de calibração igual ou melhor do que a do pireliômetro a ser calibrado (WMO, 2014).

Os pireliômetros absolutos usam um fator determinado por meio de comparação com o WSG. Após esta comparação, que podem acontecer durante os eventos de comparação internacional de pireliômetros organizados periodicamente pela WMO, estes pireliômetros podem ser usados como um padrão para calibrar, novamente por comparação com o sol como

fonte, padrões secundários e pireliômetros de campo. Pireliômetros de padrão secundário também podem ser usados para calibração de instrumentos de campo, entretanto a incerteza será maior.

Instruções para calibração de pireliômetros de campo são fornecidas pela ISO 9059 (1990), seguindo o esquema desenvolvido pela WMO.

Para pireliômetros de padrão primário e secundário recomenda-se um intervalo de 5 anos entre as calibrações rastreáveis ao WSG. Pireliômetros de campo devem ser calibrados a cada um ou dois anos. Quando mais prolongado o seu uso e mais rigorosas as condições em que são submetidos estes instrumentos, maior deverá ser a frequência de calibração.

2.3 Medições Meteorológicas

As medições meteorológicas são feitas por uma variedade de razões. São usadas para a preparação de análises climáticas, previsões e avisos meteorológicos, estudo do clima, para operações locais dependentes de condições climáticas (por exemplo, trabalhos de construção em terra e no mar), para hidrologia e meteorologia agrícola, e pesquisas em meteorologia e climatologia (WMO, 2014).

Segundo Spokas e Forcella (2006), a quantidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra varia em função da mudança das condições climáticas, bem como a mudança de posição do sol através do dia e também pela geografia de uma determinada área.

A influência das condições meteorológicas sobre a radiação solar é demonstrada em vários resultados de pesquisas. Yorukoglu e Celik (2006) apresentaram uma revisão da estimativa da radiação solar global diária a partir da duração da luz solar e demonstraram a interdependência entre a radiação solar e as condições meteorológicas, estudando os dados meteorológicos.

As variações das condições climáticas podem também alterar o funcionamento dos instrumentos radiométricos, aumentando a incerteza das medições destes equipamentos (WMO, 2014).

Desta forma, instrumentos que devem integrar as estações de monitoramento de alta precisão, além dos radiômetros para medição da radiação solar, devem monitorar outros parâmetros que influenciam a produção de energia solar, como velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, precipitação, humidade relativa e pressão atmosférica, entre outras variáveis.

2.2 Classificação das estações solarimétricas

Segundo Relva (2017), no Brasil existe apenas um documento oficial que classifica as estações solarimétricas. O documento faz parte do Ofício Circular nº 0004/2012-SPE/ANEEL, com data de 16/08/2012 e está associado à Chamada de Projeto de P&DE Estratégico nº 013/2011 com o assunto Estação solarimétrica e equipamento de medição. Este documento classifica as estações em duas configurações, de acordo com a tabela 4.

Tabela 4 - Classificação das estações solarimétricas

Medição	Configuração A (alta precisão)	Configuração B (geral)
Solar	Uma estrutura provida com o sistema de rastreamento de dois eixos, controlado por sensores solares	Estrutura firme fixa
	Um piranômetro livre para medição de irradiação global	
	Um piranômetro sombreado para medição de irradiação difusa	Dois medidores tipo "piranômetro com banda de sombra", ou
	Um pireliômetro posicionado ao sol pelo sistema de sombreamento	Um piranômetro livre para medição de irradiação global e um piranômetro sombreado para medição da irradiação difusa
Climática	Um medidor de umidade do ar	
	Um medidor de pressão barométrica	
	Um termômetro	
	Um pluviômetro	
	Um anemômetro de concha a 10 metros do solo e um medidor de direção do vento (anemoscópio) a 8,5 metros do solo ou um anemômetro ultrassônico a 10 metros acima do solo, com características iguais ou melhores ao conjunto anemômetro de concha e anemoscópio	
Comunicação e registro de dados	Um sistema de comunicação	
	Um registrador de medições (<i>datalogger</i>), com um mês de autonomia de armazenamento de dados.	

Fonte: RELVA, 2017

Este mesmo documento descreve a precisão mínima dos instrumentos radiométricos para estações de alta precisão (configuração A), observando os critérios mencionados na ISO 9060. A tabela 5 apresenta estas informações.

Tabela 5 - Precisão mínima para estações de alta precisão (ISO 9060)

Instrumentos	Grandeza mensurada	Precisão mínima (ISO 9060)	Intervalo de limpeza	Intervalo máximo de calibração
Piranômetro	Irradiação global	<i>Fisrt Class</i>	Diário	Annual
Piranômetro com sombreamento	Irradiação difusa	<i>Fisrt Class</i>	Diário	Annual
Pireliômetro	Irradiação normal direta	<i>Fisrt Class</i>	Diário	Annual
Piranômetro com banda de sombra	Irradiação global	<i>Fisrt Class</i>	Semanal	Annual
	Irradiação difusa	<i>Fisrt Class</i>		
	Irradiação normal direta	<i>Fisrt Class</i>		

Fonte: RELVA, 2017.

2.3 Localização das estações de medições

Grande cuidado deve ser tomado ao determinar a localização de um sistema de medição, de modo que interferências locais não afetem as variáveis medidas (MCARTHUR, 2005).

A escolha do local é uma etapa crítica para obter dados precisos de medição meteorológica. Em geral, o local deve representar as condições meteorológicas da área de interesse e não deve ser afetada por obstruções como colinas próximas, edifícios, estruturas ou árvores.

2.3.1 Recomendações gerais

Recomendações gerais para escolha do local ideal segundo WMO (2014) e Wilbert et. al. (2015) são apresentadas a seguir.

- a) As dimensões para o local de medição selecionado devem ter no mínimo 10 x 10 m, com uma área recomendada livre de obstruções de 25 x 25 m.
- b) Não deve haver nenhum terreno inclinado nas proximidades, e o local não deve estar em um buraco.
- c) O local deve estar bem afastado de árvores, edifícios, paredes ou outras obstruções. Se árvores ou edifícios obstruírem o horizonte de forma

significativa, locais alternativos devem ser escolhidos para observações da radiação;

- d) Evitar linhas de energia cruzando o local, seja no subsolo ou acima do solo. Além de minimizar a influência das sombras, isso é por razões de segurança a fim de evitar choques elétricos no caso de tocar nas linhas de energia e eliminar a influência dos campos elétricos que podem perturbar as medições.
- e) A distância entre os sensores de radiação e qualquer obstáculo deve ser pelo menos 10 vezes a diferença de altura entre o sensor e o obstáculo.
- f) Acima do plano de detecção, nenhuma obstrução deve estar dentro do alcance azimutal do nascer e pôr do sol durante o ano todo; qualquer obstrução acima do horizonte afeta as medições de radiação e leva a erros. Em locais onde não é possível evitar obstruções, os detalhes completos do horizonte e quaisquer obstruções devem ser incluídos na descrição da estação para facilitar uma avaliação de seu impacto.
- g) Nenhuma sombra direta, luz artificial ou reflexões de superfícies refletoras devem atingir o sensor a qualquer hora do dia e do ano.

Wilbert et. al. (2015) recomenda que algumas áreas que devem ser evitadas ao escolher o local para a instalação da estação de medição. Deve-se evitar lugares baixos onde a água possa acumular após chuvas ou inundações, áreas propensas à erosão, áreas industriais, áreas próximas a fontes emissoras de poeira, aerossóis, fuligem e outras partículas. Locais com vegetação alta ou com vegetação sazonal de rápido crescimento, e terras agrícolas irrigadas são outras áreas a serem evitadas.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA

3.1 Localização

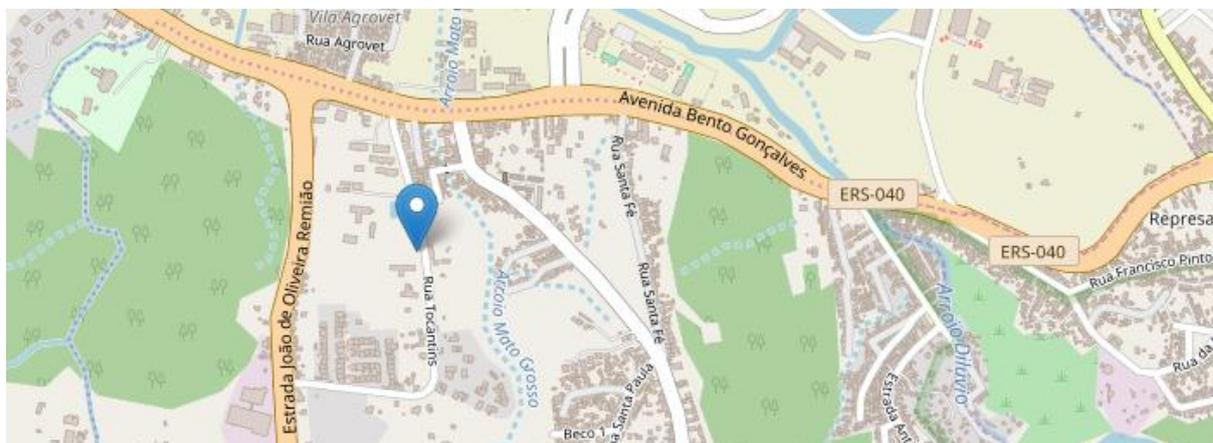
A estação solarimétrica está localizada dentro do Campus Central da UERGS, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, na cidade de Porto Alegre - RS, Brasil. Demais informações relacionadas à localização podem ser consultadas na tabela 6 e na figura 7.

Tabela 6 - Localização geográfica da estação

Cidade	Porto Alegre
Estado	Rio Grande do Sul
Coordenadas geográficas	-30.080022, -51.12856 (latitude, longitude)
Altitude	10 metros
Fuso horário padrão	UTC/GMT -3 horas

Fonte: Elaboração própria

Figura 7 - Posição geográfica da estação



Fonte: OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>

Figura 8 - Local de instalação da estação solarimétrica



Fonte: Elaboração própria

3.2 Descrição dos elementos que compõem a estação

A estação é constituída de um container equipado com um aparelho de climatização de 7500BTU de marca Comfee, com os equipamentos de medição instalados em sua base superior. Os equipamentos que compõe a estação são descritos nas seções a seguir.

3.2.1 Piranômetro

Estão instalados na estação três piranômetros termoelétricos, modelo MS-410 da fabricante japonesa EKO, montados conforme configuração apresentada na tabela 7.

Tabela 7 - Disposição dos piranômetros instalados

Orientação	Irradiação medida
Piranômetro horizontal	Irradiação global na superfície horizontal
Piranômetro inclinado	Irradiação global na superfície inclinada
Piranômetro com esfera de sombreamento instalado em um rastreador solar	Irradiação difusa horizontal

Fonte: Elaboração própria

Segundo o manual do fabricante, o modelo MS-410 está de acordo com a classificação *First Class* da ISO 9060, e é adequado para amostrar médias de 10 minutos do fluxo radiativo solar em plano horizontal ou inclinado. Seu sensor plano possui superfície revestida com tinta preta absorvente e é protegido por duas cúpulas de vidro hemisféricas transparentes.

Figura 9 - Piranômetro modelo MS-410



Fonte: Instruction Manual – Pyranometer MS-410

A tabela 8 apresenta as características operacionais do MS-410 informadas pelo fabricante comparando-as com as características dos piranômetros *First Class* de acordo com a ISO 9060.

Tabela 8 - Características operacionais do piranômetro MS-410

Característica	First Class	MS-410
Tempo de resposta (95%)	< 30s	Aprox. 18s
Zero-offset:		
Offset-A	+ 15 W/m ²	< 6 W/m ²
Offset-B	± 4 W/m ²	< 2 W/m ²
Estabilidade	± 1,5%	< 1,5%
Resposta direcional	± 20 W/m ²	< 20 W/m ²
Não-linearidade	± 1%	< 1%
Sensibilidade espectral	± 5%	< 1%
Temperature response	4%	2%
Resposta de inclinação	± 2%	< 2%
Faixa de comprimento de onda	-	285 a 3000 nm

Fonte: Instruction Manual – Pyranometer MS-410

3.2.2 Pireliômetro

A estação conta com um pireliômetro modelo MS-56 da fabricante japonesa EKO, montado sobre um rastreador solar com GPS integrado para medidas de irradiação direta normal. Segundo informações encontradas no manual do fabricante, o MS-56 é sensível à irradiação solar na faixa espectral de 200-4000nm e opera em uma faixa de temperatura de 40°C a -80°C. Possui um ângulo de abertura de 5°, geometria de ângulo de inclinação de 1° e óptica de precisão de quartzo.

Os pireliômetros modelo MS-56 são inicialmente calibrados de forma rastreável ao WRR e se encaixam na classificação *First Class* de acordo com a ISO 9060.

Figura 10 - Piranômetro modelo MS-56 montado em um rastreador solar



Fonte: Instruction Manual – Pyrheliometer MS-56 da marca EKO

A tabela 9 apresenta as características operacionais do MS-56 informadas pelo fabricante comparando-as com as características dos pireliômetros *First Class* de acordo com a ISO 9060.

Tabela 9 - Características operacionais do pireliômetro MS-56

Característica	First Class	MS-56
Tempo de resposta (95%)	< 20s	< 1s

(continua)

Característica	First Class	MS-56
Zero-offset:		
Offset-A	-	-
Offset-B	$\pm 3 \text{ W/m}^2$	$\pm 1 \text{ W/m}^2$
Estabilidade	$\pm 1\%$	$\pm 0,5\%$
Resposta direcional	-	-
Não-linearidade	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$
Sensibilidade espectral	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$
Resposta a alteração de temperatura	$\pm 2\%$	$\pm 0,5\%$
Resposta de inclinação	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,2\%$
Faixa de comprimento de onda	-	200 a 4000 nm

Fonte: Instruction Manual – Pyreliometer MS-56

3.2.3. Rastreador solar e esfera de sombreamento

O modelo que compõe a estação é o STR-22G, da marca japonesa EKO e está equipado com um tripé que o mantém fixo na estrutura de metal sobre o container.

Segundo o manual do fabricante, o rastreador é equipado com um procedimento de configuração totalmente automatizado por meio de um receptor de GPS. Possui 2 eixos e ajusta-se automaticamente à posição do sol por meio de um sistema de controle de malha fechada do sensor solar, mesmo se o rastreador não estiver orientado ou nivelado adequadamente. Possui dois braços laterais que suportam os radiômetros e a esfera de sombreamento e sua estrutura.

A figura 11 mostra o esquema de montagem do rastreador, radiômetros e esfera de sombreamento.

Figura 11 - Rastreador solar e esfera de sombreamento



Fonte: Instruction Manual – Sun tracker STR-22G da marca EKO

O movimento diurno e sazonal da terra afeta a intensidade da radiação que incide sobre uma superfície. Os rastreadores solares fazem com que os instrumentos instalados sigam a trajetória aparente do sol ao longo do dia. No caso da estação abordada neste trabalho, o rastreador solar é o dispositivo responsável pela manutenção da posição ideal da esfera de sombreamento e também do pireliômetro (MOUSAZADEH et.al., 2009).

3.2.4 Sensor de irradiação solar de silício

A estação está equipada com dois sensores de irradiação solar de silício para medidas de irradiância solar. Uma célula solar de silício pode ser usada como sensor de irradiância pois a corrente de curto circuito é diretamente proporcional à intensidade da irradiância solar. (GASPARIN et.al, 2010). Uma das células deve ser limpa semanalmente e a outra não deve ser limpa, para efeito de medição da sujidade dos sensores.

O modelo que compõe a estação é o Si-V-10TC fornecido pelo fabricante alemão Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer GmbH, construído a partir de uma célula solar de silício monocristalina (50 x 33mm) conectada a uma resistência shunt.

Figura 12 - Sensor de irradiação solar de silício



Fonte: *Ammonit Datasheet* – Silicon Irradiance Sensor Si-V-10TC

Segundo informações do fabricante, pelo fato da corrente de curto circuito sofrer influência de um coeficiente de temperatura criando um pequeno erro na medida de irradiância (Gasparin et.al, 2010), o sensor de silício possui uma forma compensação de temperatura ativa, reduzindo esse erro. A compensação é realizada usando um sensor de temperatura específico laminado na parte traseira da célula, capaz de medir também a temperatura da célula solar.

A célula solar está embebida em etileno-acetato de vinila (EVA) entre o vidro e o Tedlar e a célula laminada está integrada a uma pequena caixa de alumínio com revestimento em pó.

Tabela 10 - Características operacionais do sensor Si-V-10TC

Característica	Valor/Descrição
Tempo de resposta (99%)	0,15s
Incerteza de medição	$\pm 5 \text{ W/m}^2$ $\pm 2,5 \text{ W/m}^2$ de leitura válida para compensação de temperatura
Offset	2 W/m^2
Não-linearidade	$\pm 0,10\%$
Erro	$\pm 2,0^\circ \text{ C}$
Temperatura de operação	-35 a $+80^\circ \text{ C}$
Dimensões/peso	155 x 85 x 39 mm / 350 gramas

Fonte: *Ammonit Datasheet* – Silicon Irradiance Sensor Si-V-10TC

3.2.5 Anemômetro

O modelo que compõe a estação é o Compact S12100H da marca Thies Clima, e é um anemômetro de copos.

Figura 13 – Anemômetro Thies Compact S12100H



Fonte: *Ammonit Datasheet* – Anemometer Thies Compact S12100H

Um anemômetro mede a velocidade da componente horizontal do vento, ou seja, a quantidade total de massa de ar que, em unidade de tempo, passa através da parte sensível do instrumento, fornecendo parte de sua energia cinética para os copos ou hélices que são induzidos a girar (CAMUFFO, 2013).

Segundo informações fornecidas pelo fabricante, o equipamento possui sensor de velocidade optoeletrônico que produz uma frequência proporcional à velocidade do vento, que por sua vez é disponibilizada como sinal de saída.

O anemômetro é equipado com um sistema de aquecimento regulado eletronicamente para evitar gelo nos rolamentos, os copos são feitos de fibra de vidro reforçado e o invólucro é feito de alumínio anodizado e plástico.

Tabela 11 - Características operacionais do Compact S12100H

Característica	Valor/descrição
Velocidade inicial	0,5 m/s
Faixa de medição	0 a 50 m/s
Resolução	< 0,1 m/s

(continua)

Característica	Valor/descrição
Temperatura de operação	-40 a +70° C
Precisão	± 3% medição de ponto único (MEAS), entretanto > 0,5 m/s
Velocidade máxima	80 m/s (30 minutos)

Fonte: *Ammonit Datasheet* – Anemometer Thies Compact S12100H

3.2.6 Anemoscópio

A estação conta com um anemoscópio modelo Thies Compact TMR da fabricante Thies. O anemoscópio, *wind vane* em inglês, é o instrumento usado para medidas de direção do vento. (CAMUFFO, 2013).

Figura 14 – Anemoscópio Thies Compact TMR



Fonte: *Ammonit Datasheet* – Wind Vane Thies Compact TMR

Segundo informações do fabricante, o modelo instalado é um anemoscópio de baixa inércia com eixo em rolamentos de esferas e possui um ímã magnetizado diametralmente na extremidade interna. A posição angular do eixo é dada por um sensor de magnetoresistência de túnel (TMR de *tunnel magneto resistance*), que fornece duas tensões dependentes de seno e cosseno como sinal de saída. A partir desta tensão é calculada a direção do vento em graus, com precisão de $\pm 1^\circ$.

Tabela 12 - Características operacionais do Compact S12100H

Característica	Valor/descrição
Saída	Síncrono, dado serial 10 bits
Faixa de medição	0 a 360°
Resolução	0,35°
Temperatura de operação	-40 a +70° C
Precisão	± 1°
Velocidade máxima	80 m/s (30 minutos)
Peso	0,4 Kg

Fonte: *Ammonit Datasheet* – Wind Vane Thies Compact TMR

3.2.7 Barômetro

O modelo de barômetro que compõe a estação é o *Barometric pressure sensor AB 60*, da marca Ammonit. Sensores de pressão barométrica (barômetros) medem a pressão atmosférica ou barométrica (WMO, 2014). De acordo com as informações disponibilizadas pelo fabricante, o instrumento possui sensor piezelétrico e é montado em um invólucro de aço inoxidável.

Figura 15 - Sensor de pressão barométrica



Fonte: *Ammonit Datasheet* – Barometric pressure sensor AB 60

A tabela 12 apresenta algumas características operacionais do sensor de pressão barométrica instalado na estação.

Tabela 13 - Características operacionais do sensor Ammonit AB 60

Característica	Valor/descrição
Pressão de operação	800 a 1100 nPa (mbar) (altitude: ≤ 1400 m)
Offset	800 hPa
Faixa de umidade	0 a 98% UR
Temperatura de operação	-40 a +85° C
Precisão total (-10 a 60° C)	$\pm 1\%$ (saída em escala completa) (± 3 hPa; *FSO é 300hPa)
Peso	80 g

Fonte: *Ammonit Datasheet* – Barometric pressure sensor AB 60

*FSO: (full scale output) descreve a diferença entre o limite superior e o limite inferior da faixa de pressão.

3.2.8 Pluviômetro

O pluviômetro que compõe a estação é o modelo 52250 com proteção contra pássaros do fabricante R.M Young Company, utilizado para medidas de precipitação em milímetros lineares (WMO, 2014).

Figura 16 - Pluviômetro modelo Young 52250



Fonte: *Ammonit Datasheet* – Young Precipitation Sensor 52250

Segundo informações fornecidas pelo fabricante, o modelo instalado é do tipo caixa basculante e cumpre as especificações da Organização Meteorológica Mundial (WMO).

Tabela 14 - Características operacionais do sensor de precipitação Young 52250

Característica	Valor/descrição
Superfície de coleta	200 cm ²
Resolução	0,1 mm
Precisão	2% até 25 mm/h 3% até 50 mm/h
Faixa de temperatura	-20 a 50° C
Princípio de medição	Caixa basculante

Fonte: *Ammonit Datasheet* – Young Precipitation Sensor 52250

3.2.9 Termo-higrômetro

O termo higrômetro que compõe a estação é o KP S52100 do fabricante Galtec, e conta com uma capa protetora contra chuva e radiação.

Figura 17 - Termo-higrômetro e capa protetora



Fonte: *Ammonit Datasheet* – Temperature Humidity Sensor KP S52100

Os termo-higrômetros são instrumentos que unem dois sensores, um sensor de umidade que mede a umidade relativa do ar e um sensor de temperatura para medir a temperatura ar. Estes dois sensores são geralmente combinados em um mesmo instrumento com o objetivo de redução de custos (WMO, 2014).

Características de operação informadas pelo fabricante estão descritas na tabela 14.

Tabela 15 - Características operacionais do termo-higrômetro KP S52100

Característica	Sensor de temperatura	Sensor de umidade
Faixa de medição	-30 a +70° C	0 a 100% UR
Precisão	± 0,2° C	± 2% UR
Faixa de temperatura operação	-40 a +80° C	
Mínima velocidade do vento	≥ 0,5 m/s	

Fonte: *Ammonit Datasheet* – Temperature Humidity Sensor KP S52100

3.2.10 Datalogger

A estação conta com um *datalogger* Ammonit, modelo Meteo-40, equipamento que faz a coleta e armazenamento dos dados medidos pelos instrumentos de medição que compõem a estação.

Figura 18 - Datalogger Ammonit Meteo-40



Fonte: *Ammonit Datasheet* – Datalogger Ammonit Meteo-40M

O *datalogger* envia os dados de medição automaticamente em formato CSV via conexão de internet SCP criptografada a uma plataforma de monitoramento online chamada *AmmonitOR*. Por meio da plataforma *AmmonitOR* é possível ter acesso aos dados medidos pela estação online, com qualquer computador. Os dados podem ser visualizados e exportados em formato CSV para posterior análise.

3.2.11. Outros equipamentos

A estação também conta com dois módulos solares fotovoltaicos e um conjunto de baterias para a alimentação da estação.

4. MODELO COMPUTACIONAL DE IRRADIÂNCIA SOLAR ESPECTRAL: SMARTS2

Os modelos de irradiância solar espectral são necessários em uma variedade de aplicações em diferentes disciplinas como a ciência atmosférica, biologia, e sistemas baseados em energia solar. Segundo Haag (2012), existem diferentes modelos para prever ou analisar a radiação solar na superfície da Terra. Dois exemplos conhecidos são os modelos LOWTRAN, originado na década de 70 e o MODTRAN, que passou a substituir o modelo LOWTRAN. Este tipo de modelo considera que a atmosfera é constituída de diferentes camadas, e utiliza perfis verticais de referência ou medidos dos componentes gasosos e aerossóis.

Em virtude da complexidade do modelo MODTRAN e por exigir dados detalhados, este modelo não é apropriado para aplicação neste trabalho. Desta forma, para fins de estimativa de irradiação solar global horizontal, o modelo utilizado foi o programa computacional SMARTS2, um programa parametrizado simples para estimativas de irradiância espectral em atmosfera sem a presença de nuvens.

O Modelo Simples da Transferência Radiativa Atmosférica da Luz do Sol, do inglês *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine* (SMARTS2), foi desenvolvido pelo Dr. Christian Gueymard e calcula as irradiâncias espectrais de céu claro (irradiação solar direta, circunsolar, difusa e global no plano inclinado ou horizontal) para condições atmosféricas específicas. O programa possibilita a opção de escolha de 10 diferentes condições atmosféricas padrões e também a inserção de dados próprios. É possível também especificar a saída para um ou mais pontos no tempo ou geometrias solares. A resolução espectral é de 1 nm para 280-1700 nm e 5 nm para 1705-4000 nm. O arquivo gerado pelo programa consiste em arquivos de texto em formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) (GUEYMARD, 1995).

Segundo Myers (2013), este modelo mostra-se bastante versátil, com um grande número de aplicações em diversas áreas. Isto é possível pois o modelo oferece, entre outras características, uma série de opções além dos cálculos centrais. Outras características que podem ser citadas acerca deste modelo são:

- a) O modelo usa funções de transmissão espectral precisas e regularmente atualizadas.
- b) Fornece melhor resolução espectral sobre os modelos de transmissão existentes.

- c) Produz irradiações espectrais comparáveis às previsões de MODTRAN com entradas muito mais simples.
- d) As previsões podem ser facilmente e diretamente comparadas com medições espectrorradiométricas usando funções internas.

5. ANÁLISE DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA

Conforme descrito no item 3.1 deste trabalho, a estação está localizada nas dependências do Campus Central da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

A estação está posicionada de forma que os equipamentos sofrem obstruções de uma construção ao sul e influência de sombras causadas por árvores e outros tipos de vegetação existentes ao seu redor. Os bloqueios sofridos pela estação podem ser vistos nas figuras a seguir.

Figura 19 - Obstrução causada por construção ao sul da estação



Fonte: Elaboração própria

Figura 20 - Bloqueio de radiação incidente causado por árvores



Fonte: Elaboração própria

Ao observar as imagens feitas do local onde está posicionada a estação, é possível constatar que ao escolher a localização não foram observadas as recomendações da WMO (2014) e MCARTHUR (2005) consideradas neste trabalho quanto à escolha do local ideal. Segundo estas publicações, recomenda-se que, se possível, nenhuma obstrução deve estar presente, particularmente dentro da faixa de azimute do nascer e do pôr do sol ao longo do ano.

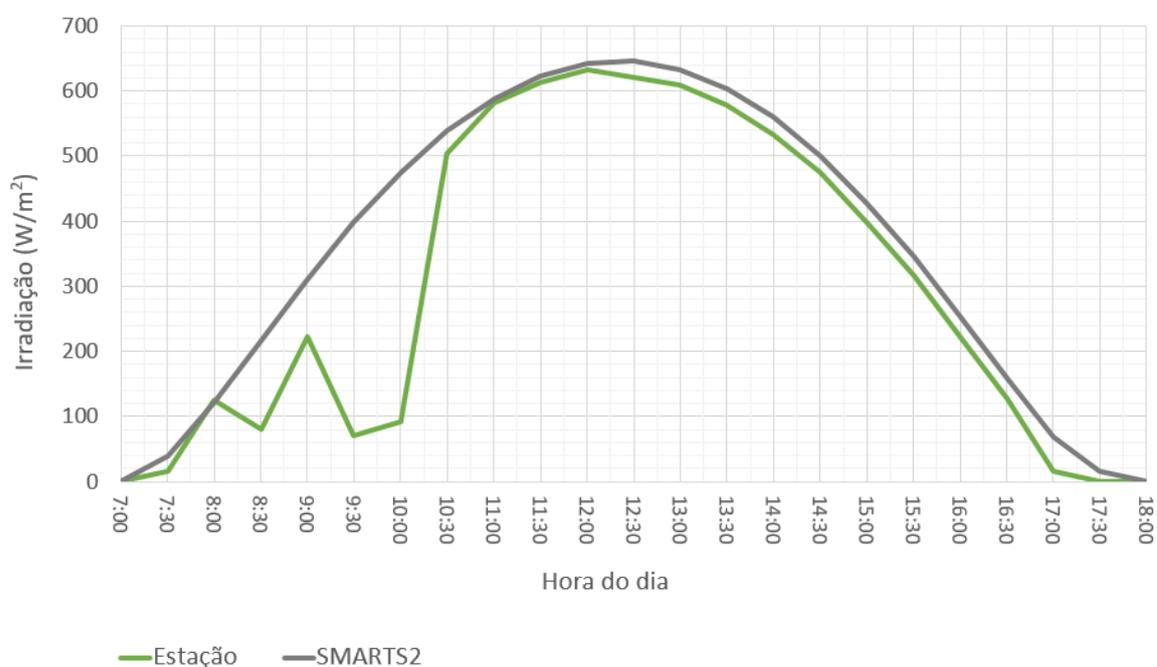
Desta forma, as medidas de irradiação obtidas pelos radiômetros da estação são influenciadas pelo horizonte obstruído, de modo que a irradiação incidente é bloqueada durante parte do tempo, desqualificando ou inviabilizando o uso destes dados de medição, uma vez que é essencial obter medições precisas de forma a garantir a qualidade dos dados produzidos.

6. COMPARATIVO ENTRE AS TRAJETÓRIAS DA IRRADIAÇÃO MEDIDA E SIMULADA

Esta seção apresenta uma comparação entre a irradiação global horizontal medida pela estação solarimétrica e a irradiação obtida por simulação.

O gráfico 1 apresenta a irradiância de céu claro medida no dia 25 de maio de 2018 e uma trajetória simulada da irradiância obtida usando o modelo computacional para condições de céu limpo SMARTS2, modelo parametrizado para estimativas de irradiância em atmosfera sem a presença de nuvens abordado no item 4.

Figura 21 – Representação gráfica da irradiação global horizontal medida e simulada



Fonte: Elaboração própria

No gráfico é possível verificar a média horária da irradiação global horizontal para o dia 25/05/2018. Em linha na cor verde observa-se a trajetória dos dados reais durante o dia, e em linha na cor cinza a trajetória dos dados simulados pelo SMARTS2. É possível identificar uma pequena subestimação do modelo e também observar que a maior parte dos dados simulados acompanham os dados medidos pela estação entre os intervalos de 10:30 a 18:00 horas.

Verifica-se que a trajetória dos dados medidos não acompanha a trajetória dos dados simulados entre os intervalos de 08:00 e 10:30 horas. Esta discrepância entre os dados reais e

simulados indica a possibilidade de obstrução da radiação solar incidente nos instrumentos por não terem sido observadas as recomendações da WMO (2014) e MCARTHUR (2005) consideradas neste trabalho quanto à escolha do melhor local para posicionamento da estação.

7. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um material descritivo que documentasse a estrutura da Estação Solarimétrica instalada nas dependências da UERGS – Campus Central em Porto Alegre, bem como os instrumentos que a compõe.

Adicionalmente analisou-se o local onde a estação está posicionada e, visto que as recomendações consideradas neste trabalho quanto aos aspectos que devem ser observados não foram seguidos, é possível constatar que a estação não está localizada em um local adequado, uma vez que as medidas de irradiação obtidas pelos radiômetros da estação são influenciadas pelo seu entorno.

Ao simular a trajetória da irradiação global ao longo do dia com o programa computacional SMARTS2 e comparar com os dados medidos pela estação, observou-se que a trajetória dos dados medidos não acompanha a trajetória dos dados simulados entre os intervalos de 08:00 e 10:30 horas. Esta discrepância entre os dados reais e simulados indica de fato uma obstrução da radiação solar incidente pela vegetação e construções no entorno da estação.

Por fim, ao descrever a estação solarimétrica, seus equipamentos e reunir outras informações pertinentes acerca do sistema de monitoramento, este trabalho mostrou-se útil e de valor agregado, se tornando um documento que poderá nortear trabalhos futuros que venham a ter a Estação Solarimétrica – Campus Central e seus dados de medição como objeto de estudo.

REFERÊNCIAS

Ammonit Datasheet – Silicon Irradiance Sensor Si-V-10TC.

Ammonit Datasheet – Anemometer Thies Compact S12100H.

Ammonit Datasheet – Wind Vane Thies Compact TMR.

Ammonit Datasheet – Barometric pressure sensor AB 60.

Ammonit Datasheet – Young Precipitation Sensor 52250.

Ammonit Datasheet – Temperature Humidity Sensor KP S52100.

Ammonit Datasheet – Datalogger Ammonit Meteo-40M.

Camuffo, D. Microclimate for Cultural Heritage, Second Edition: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments 2 ed. Elsevier Science, 2014.

Duffie, J. A; Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. 4 ed. Wiley. EUA, 2013.

EKO Instruction Manual – Pyrheliometer MS-56.

EKO Instruction Manual – Pyranometer MS-410.

EKO Instruction Manual – Sun tracker STR-22G.

Gasparin, F. P. et.al. Influência da temperatura na medida de irradiância solar com células de referência de silício cristalino. III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém, 2010.

Gueymard, C.A. SMARTS2, A Simple Model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Report FSEC-PF-270-95. Florida Solar Energy. University of Central Florida. USA, 1995.

Haag, R. Estimativa da Distribuição Espectral da Radiação Solar sobre o Território Brasileiro Através de Análise Multiinstrumental, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

ISO (International Organization for Standardization). ISO/TR 9901:1990. Solar energy - Field pyranometers - Recommended practice for use. 1990.

ISO (International Organization for Standardization). ISO 9060:1990. Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. 1990.

ISO (International Organization for Standardization). ISO 9059:1990. Solar energy - Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer. 1990.

- McArthur, L. J. B. Baseline Surface Radiation Network (BSRN), Operations Manual, Version 2.1", WCRP-121, WMO/TDNo.1274. 2005.
- Mousazadeh, H. et.al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran. Iran, 2009.
- Myers, D. R. Solar Radiation. Practical Modeling for Renewable Energy Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group. EUA, 2013.
- NREL. Final technical report national solar radiation data base (1961-1990). National Renewable Energy Laboratory. EUA, 1995.
- Relva, S. Método de caracterização de irradiação para geração fotovoltaica: Uma análise sistêmica da modelagem da energia primária. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- Rosa, D. J. de M. Caracterização da radiação solar: O caso da cidade Universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- Spokas, K.; Forcella, F. Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data. Cambridge University Press. Weed Science, 2006.
- Tiba, C. et.al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Ed. Universitária da UFPE. Recife, 2000.
- Vignola, F. et.al. Solar and Infrared Radiation Measurements. CRC Press, Taylor & Francis Group. EUA, 2012.
- World Meteorological Organization. Guide to Meteorological. Instruments and Methods of Observation. 7 ed. WMO. Geneva, 2014.
- Wilbert, S. et.al. Best Practices for Solar Irradiance Measurements with Rotating Shadowband Irradiometers. A report of IEA SHC Task 46, Solar Resource Assessment and Forecasting. SHC, 2015.
- Yorukoglu, M.; Celik, A. N. A Critical Review on the Estimation of Daily Global Solar Radiation from Sunshine Duration. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Mustafa Kemal University. Turkey, 2006.