

## IRRADIÂNCIA SOLAR (GLOBAL, DIRETA E DIFUSA) – METODOLOGIA DE CONTROLO DE QUALIDADE: APLICAÇÃO A SÉRIES TEMPORAIS MEDIDAS NO LES/LNEG, LISBOA

Marques F.\*, Páscoa S.\*, Carvalho M.J.\*, Cardoso J.P.\*†

\* Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, Portugal.

†E-mail: [joao.cardoso@lneg.pt](mailto:joao.cardoso@lneg.pt)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.6101>

### RESUMO

A medida das componentes da radiação solar (global, direta e difusa) é muito importante na caracterização de sistemas solares e seus componentes (ex.: coletores solares) em laboratório. As normas de ensaio definem os requisitos necessários aos equipamentos utilizados para a realização das referidas medidas, mas não definem o controlo de qualidade dos dados. A necessidade de medir não só a componente global da radiação solar no plano do coletor, mas também a radiação direta e difusa, permite ao LES ser também detentor de uma base de dados útil noutras áreas de investigação de sistemas de conversão da radiação solar. Desenvolveu-se a aplicação, SIMONEAPP, que integra um controlo de qualidade seguindo o método QCRADv2. Quando aplicada ao período 2015-2018, permitiu identificar erros de medida de irradiância difusa decorrentes do uso de anel de sombreamento e outros erros de medida da irradiância previamente identificados durante a operação regular da estação meteorológica. No entanto, a metodologia assinalou potenciais erros entre os 2° e os 19° de altitude solar, cuja natureza será ainda necessário investigar.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar, Medição de Irradiância, Análise de Qualidade de Dados

### ABSTRACT

For characterization in laboratory of solar systems and their components (e.g. solar collectors) the measurement of the solar radiation components (global, direct and diffuse) is very important. The test standards define the necessary requirements for the equipment used to carry out these measures, but do not define data quality control. The need to measure not only the global component of solar radiation in the plane of the collector but also direct and diffuse radiation, allows LES to also be the holder of a database useful in other areas of research of solar radiation conversion systems. An application was developed, SIMONEAPP, which integrates quality control according to the method QCRADv2. When applied to the 2015-2018 period, it allowed the identification of diffuse irradiance measurement errors resulting from the use of a shading ring and other irradiance measurement errors previously identified during the regular operation of the meteorological station. However, the methodology pointed out potential errors between 2° and 19° solar altitude whose nature will still be necessary to investigate.

KEYWORDS: Solar Energy, Irradiance Measurement, Data Quality Analysis

## INTRODUÇÃO

A medida das componentes da radiação solar (global, direta e difusa) é muito importante na caracterização de sistemas solares e seus componentes (ex.: coletores solares) em laboratório. As normas de ensaio definem os requisitos necessários aos equipamentos utilizados para a realização das referidas medidas (ISO 9806:2017; ISO 9459-2:1995; ISO 9459-5:2007) mas não definem o controlo de qualidade dos dados, especialmente no que se refere à consistência entre as diferentes componentes. Dependendo do método de ensaio, a(s) componente(s) da radiação relevante(s) são medidas/determinadas para o plano dos coletores dos equipamentos em ensaio. Para coletores não concentradores, a irradiância global medida no plano do coletor é suficiente para a caracterização do coletor, no entanto, quando se pretende caracterizar um coletor concentrador ou do tipo CPC, a decomposição da radiação global em radiação direta e difusa é fundamental (T.Osório & Carvalho, M.J., 2013).

A necessidade de medir não só a componente global da radiação solar no plano do coletor, mas também a radiação direta e difusa, permite ao Laboratório de Energia Solar (LES) ser também detentor de uma base de dados que se torna útil noutras áreas, por exemplo, na caracterização de sistemas de captação e conversão da radiação solar integrados nos edifícios (Karol Bote et al., 2020).

Diversas fontes de erro e incerteza estão associadas ao ato de medir a irradiância solar (Muneer and Fairouz 2002, Younes et al. 2005) pelo que se torna necessário adotar procedimentos que minimizem o seu impacto nas bases de dados resultantes dessas medições. Até ao momento, para além das calibrações regulares dos equipamentos, os dados medidos no LES eram alvo de uma análise gráfica dos vários componentes da radiação de modo a identificar inconsistências, um processo moroso passível de ser substituído e automatizado por um método computacional.

Este trabalho descreve de forma sucinta a instalação meteorológica do LES, apresenta o procedimento seguido pelo programa computacional e aplica-o a à série de dados obtida no LES-LNEG entre 2015 e 2018.

## MÉTODO DE MEDIÇÃO

O Laboratório de Energia Solar (LES) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. (LNEG) recolhe dados meteorológicos no campus do Lumiar em Lisboa. Estes são utilizados nos ensaios de coletores e sistemas solares, e na caracterização da irradiação solar noutras instalações experimentais existentes no campus, como por exemplo o Edifício Solar XXI (Karol Bot et al., 2020). Para tal, o LES dispõe de equipamentos para a medida das componentes da radiação solar - direta no plano normal e global e difusa no plano horizontal - e a medida da temperatura ambiente. A medição destas grandezas é efetuada com taxas de aquisição de pelo menos um minuto. Os equipamentos existentes são os listados na Tabela 1 e estão sujeitos a calibrações periódicas - anual interna no caso dos piranómetros e externa bienal no caso do pireliómetro.

Tabela 1. Equipamentos utilizados no LES para medida de irradiância solar.

SOLYS2 Sun Tracker	Irradiância direta	Pireliómetro Kipp & Zonen CHP1
	Irradiância global na horizontal	Piranómetro Kipp & Zonen CM6B
	Irradiância difusa na horizontal	Piranómetro Kipp & Zonen CM6B com anel/esfera sombreadora
Temperatura ambiente		Resistência de platina com leitura a quatro fios

Como sistema de sombreamento da irradiância difusa, usou-se um anel sombreador até Maio de 2016 e uma esfera sombreadora a partir de Junho de 2016.

## METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

A metodologia de processamento de dados de irradiância solar agora implementada pretende automatizar a integração de novas medidas em base de dados e o processo de deteção de possíveis erros. Para tal, é efectuada uma análise de qualidade que qualifica os valores medidos que podem apresentar problemas relacionados com o funcionamento incorreto do equipamento de medição, o processo de aquisição e o de registo de dados. Estes passos são executados através de uma aplicação desenvolvida a partir de um script de Python, apelidada de SIMONEAPP (Solar radIation Measurements prOcessiNg codE APP).

No processo de aquisição de dados, os valores brutos são adquiridos por um *data logger* a partir dos equipamentos de medida (valores de tensão). Estes são convertidos por uma macro Excel em valores de irradiância ( $W.m^{-2}$ ) a partir das respetivas constantes de calibração. Quando os novos dados são importados pela SIMONEAPP, são sujeitos a

uma filtragem e tratamento inicial para identificação dos valores que apresentem problemas derivados do seu processo de aquisição e registo de dados. O equipamento de aquisição de dados exporta um ficheiro que inclui cinco colunas: uma para a informação de data e hora da medida e outras quatro para as medidas de irradiância e temperatura (ver Tabela 1). Os valores medidos são importados para uma tabela de dados recorrendo ao módulo *Pandas* do Python. O processo de importação inclui uma série de testes para garantir a integridade dos dados e fluidez do processo. Efetivamente, existe sempre a possibilidade de erro humano ou de processamento quer na compilação dos dados, quer na sua cópia, pelo que é necessário testar a presença de irregularidades, comparando o ficheiro de registo dos dados medidos, com a codificação e formatos esperados. Tal é particularmente relevante quando se adicionam dados passados à base de dados pois, apesar de se encontrar hoje padronizado, o formato de registo dos dados medidos foi variando ao longo dos anos com os diferentes investigadores responsáveis pela estação radiométrica. Problemas conhecidos, como por exemplo, nomes de colunas inconsistentes, são corrigidos automaticamente.

Após o processo de importação, segue-se a filtragem de valores problemáticos relacionados com o funcionamento incorreto do equipamento de medição, aquisição e registo de dados: quer os correspondentes a períodos previamente identificados com problemas, quer os correspondentes a formatos de conteúdo incorretos. Valores de data-hora de medida em formato desconhecido são assinalados como NaT (*Not a Time*) e são eliminados. Medições em tempos conhecidos, mas de valores com formato desconhecido ou registos incorretos, são colocadas como NaN (*Not a Number*). Finalmente, existe a filtragem de medições em tempo duplicado, que são assinaladas. Estas medições são posteriormente avaliadas pelo investigador responsável, que decide a sua filtragem ou método de correção, consoante seja identificada a causa da falha. A tabela resultante segue então para a próxima etapa. Note-se que os valores medidos não foram alterados em nenhum dos passos anteriores.

Segue-se a análise do período de amostragem da série temporal de dados. Quer por existência prévia, quer resultante do processo anterior de filtragem, os dados podem conter lacunas nas medições ou períodos entre uma aquisição e a subsequente acima do esperado (ver Fig. 1). Convencionou-se dois períodos padrão entre aquisições de dados subsequentes: 30 s e 2 min, sendo que após Abril de 2016 se espera que todas as aquisições tenham um intervalo de 2 min. Intervalos acima deste valor são normalmente múltiplos destes períodos pelo que nesta etapa quaisquer intervalos anómalos são subdivididos em períodos intermédios de 2 min. Os valores destes tempos intermédios correspondem a problemas na aquisição, sendo colocados a NaN. Note-se que, mais uma vez, os valores medidos não são alterados por este processo, apenas são identificados os valores intermédios com erro.

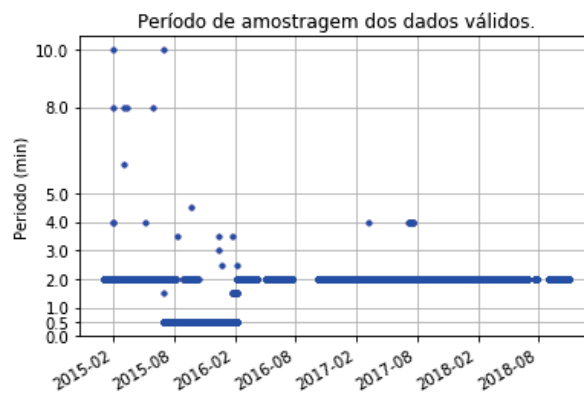


Fig. 1. Gráfico do período de amostragem ao longo de toda a série temporal de dados analisada: períodos convencionados de 30s ou 2 min.

Finalizados estes passos, a série temporal de novos dados de medida encontra-se consistente com a estrutura da base de dados e pronta a ser adicionada. Prossegue-se com a etapa seguinte: análise da qualidade dos valores medidos. A metodologia aplicada é a *QCRadv2* (Long and Dutton, 2002). Esta foi escolhida com base no estudo comparativo de Marques et al. (2020) que confirmou o bom desempenho desta metodologia – obtendo nesse estudo uma sensibilidade de 80% e especificidade máxima. A metodologia *QCRadv2* segue três fases:

1. Avaliação da exequibilidade física dos valores: seis testes que avaliam os limites superior e inferior para as 3 componentes da irradiância, de acordo com a Tabela 2;
2. Avaliação da existência de valores extremamente raros: seis testes que avaliam os limites superior e inferior para as 3 componentes medidas, de acordo com a Tabela 3;
3. Avaliação da coerência das medidas de irradiância: um teste que avalia a relação entre a irradiância global no plano horizontal e a soma da irradiância difusa no plano horizontal com a irradiância direta no plano horizontal, de acordo com a Tabela 4 - onde  $r = G_h / (G_{d,h} + G_{b,h})$ . No caso de não estarem disponíveis medições da irradiância direta, aplica-se o teste à razão da irradiância difusa pela irradiância global.

Tabela 2. Parâmetros para avaliação de valores fisicamente possíveis.

Quantidade	Limite Inferior [Wm <sup>-2</sup> ]	Limite Superior [Wm <sup>-2</sup> ]
Irradiância Global horizontal ( $G_h$ )	-4	$G_{SC}/AU^2 \times 1.5 \times (\cos \theta_z)^{1.2} + 100$
Irradiância Difusa horizontal ( $G_{d,h}$ )	-4	$G_{SC}/AU^2 \times 0.95 \times (\cos \theta_z)^{1.2} + 50$
Irradiância Direta Normal ( $G_{b,n}$ )	-4	$G_{SC}/AU^2$

Tabela 3. Parâmetros para avaliação de valores extremamente raros.

Quantidade	Limite Inferior [Wm <sup>-2</sup> ]	Limite Superior [Wm <sup>-2</sup> ]
Irradiância Global horizontal ( $G_h$ )	-2	$G_{SC}/AU^2 \times 1.2 \times (\cos \theta_z)^{1.2} + 50$
Irradiância Difusa horizontal ( $G_{d,h}$ )	-2	$G_{SC}/AU^2 \times 0.75 \times (\cos \theta_z)^{1.2} + 30$
Irradiância Direta Normal ( $G_{b,n}$ )	-2	$G_{SC}/AU^2 \times 0.95 \times (\cos \theta_z)^{0.2} + 10$

 Tabela 4. Parâmetros para avaliação da coerência dos valores de irradiância – nota:  $r = G_h / (G_{d,h} + G_{b,h})$ .

Equação da relação física entre os valores medidos	Limite Inferior [W m <sup>-2</sup> ]	Limite Superior [W m <sup>-2</sup> ]
$G_h - (G_{d,h} + G_{b,h})$		$(1-r) G_h$ , com $0.92 < r < 1.08$ para $\theta_z < 75^\circ$ ; $0.85 < r < 1.15$ para $93^\circ > \theta_z > 75^\circ$ ; e $G_{d,h} + G_{b,h} > 50$
$G_{d,h}/G_h$	—	$1.05$ para $\theta_z < 75^\circ$ ; $1.10$ for $93^\circ > \theta_z > 75^\circ$ ; e $G_{d,h} + G_{b,h} > 50$

O ângulo zenital é calculado para o instante de registo dos valores medidos recorrendo ao módulo de Python *Astropy* (The Astropy Collaboration et al. 2013, 2018) para a longitude, latitude e altitude fornecidas, correspondentes ao local onde foram realizadas as respetivas medições.

Ao longo deste processo, sempre que a aplicação deteta erros numa das etapas, assinala os elementos em causa e informa o utilizador através da apresentação de uma mensagem de erro e de uma tabela com os erros detetados. Finalizado o processo de análise automática dos dados, estes são inseridos na base de dados global.

## RESULTADOS

Para fins de teste e demonstração, o novo método de processamento de dados baseado na SIMONEAPP foi aplicado a uma série de dados não processados medidos no LES entre o ano de 2015 e 2018. Este identificou cerca de 10% dos valores como erros possíveis na série temporal de dados medidos. O número de erros detetados é maior para os anos de 2015 e 2016, sendo idêntico para 2017 e 2018 (ver Fig. 2).

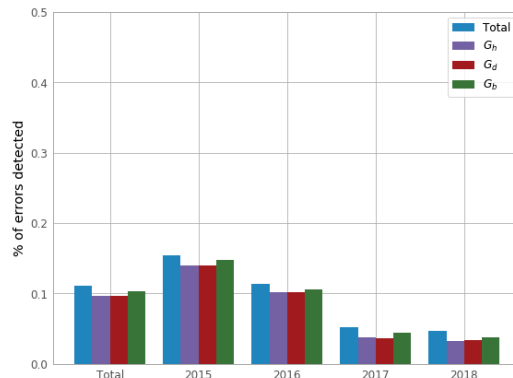


Fig. 2. Percentagem de valores identificados como erro nos dados para os diferentes anos analisados.

Embora os gráficos da Fig. 3 mostrem alguns potenciais erros assinalados na fase 1 e 2 do processo de controlo de qualidade, perto do nascer e do pôr do sol, a maioria dos problemas são assinalados na fase 3, a fase que testa a coerência dos valores de irradiação medidos. A observação da grande prevalência de problemas assinalados na fase 3 até metade de 2016, indicia a sua provável origem em problemas com os valores da irradiação difusa obtidos até Maio de 2016 com o auxílio de um anel de sombreamento.

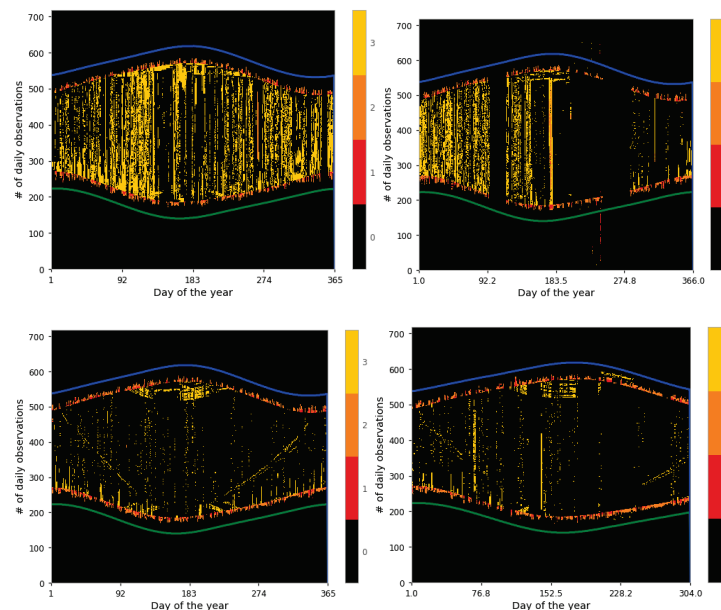


Fig. 3. Gráfico anual dos resultados do controlo de qualidade para os dados de irradiação difusa horizontal do LES-LNEG. Do canto superior esquerdo para o canto inferior direito: 2015, 2016, 2017, 2018. Os números correspondem à fase de testes de qualidade, onde 0 corresponde a nenhuma deteção. Crepúsculo civil: matutino - linha verde; vespertino - linha azul.

Procedeu-se à aplicação dos fatores de correção às medidas da componente horizontal da irradiação difusa de acordo

com o manual da banda de sombreamento (Kipp&Zonen, 2004). A série temporal resultante foi novamente submetida a análise de qualidade. Comparando os resultados apresentados na Fig. 4 com os da Fig. 3 observa-se uma melhoria. Efetivamente, comparando o gráfico da esquerda da Fig. 5 com a Fig. 2, observa-se uma diminuição do número de erros detetados em 2015 de cerca de 5 pontos percentuais. No entanto, continua a existir uma grande quantidade de possíveis erros assinalados na fase 3 do controlo de qualidade.

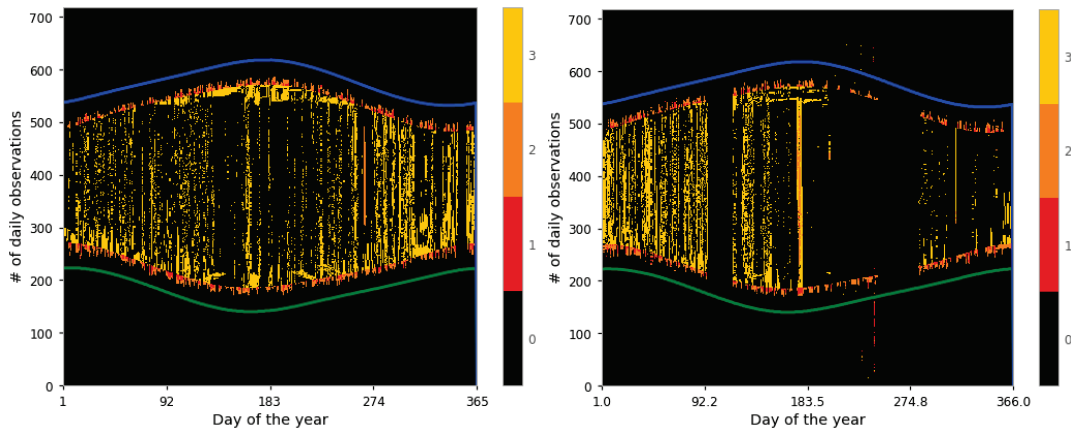


Fig. 4. Gráfico anual dos resultados do controlo de qualidade para os dados de irradiância difusa horizontal do LES-LNEG de 2015 e 2016, após aplicação de um fator de correção correspondente ao uso de anel de sombreamento. Os números correspondem à fase de testes de qualidade, onde 0 corresponde a nenhuma deteção. Crepúsculo civil: matutino - linha verde; vespertino - linha azul.

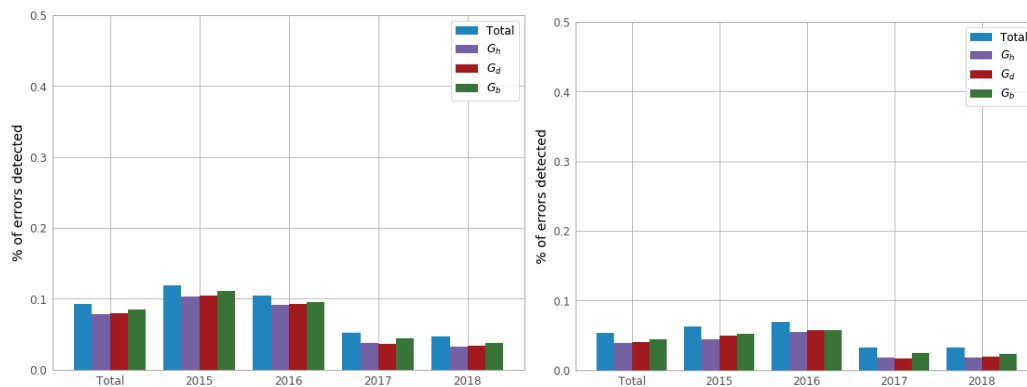


Fig. 5. Gráfico da percentagem de erros detetados nos dados para anos diferentes, após aplicação do fator de correção. Gráfico da direita assinala apenas o teste ao rácio da irradiância difusa na fase 3 da análise de qualidade.

A observação de uma amostra dos valores assinalados permitiu identificar a existência de valores anómalos para a irradiância normal direta, registados como  $0 \text{ W.m}^{-2}$ , o que é indicador de um problema não conhecido na sua medição ou registo. No caso de não existirem valores medidos de irradiância direta, a fase 3 da análise de qualidade testa a razão da irradiância difusa pela irradiância global (Tabela 4). Tal permite individualizar os problemas de consistência entre a irradiância difusa e a global. Desta forma, retirando da análise as entradas anómalas da irradiância normal direta é possível identificar os restantes problemas de consistência entre a componente global e difusa da irradiância. A existência de uma redução substancial dos erros identificados na fase 3 (ver Fig.5 e Fig.6) reforça a conclusão de que na maior parte dos casos o problema poderá encontrar-se na medição da radiação direta.

Removendo os problemas da consistência dos valores medidos, ficam alguns potenciais erros pontuais e, como referido acima, uma quantidade considerável de potenciais erros assinalados na fase 1 e 2, junto ao nascer e ao pôr do sol para altitudes solares inferiores a  $19^\circ$ . A existência de edifícios próximos do local de instalação dos equipamentos de medida, que se situa ao nível do solo, resulta na existência de sombras que podem ser a causa de alguns destes erros. Outras possibilidades consistem na existência de fontes de luz adicionais (ex.: reflexos), a operação dos sensores e a inadequação da metodologia ou da sua aplicação para a localização da instalação e situações de baixas altitudes solares. Estas possibilidades serão investigadas num trabalho futuro.



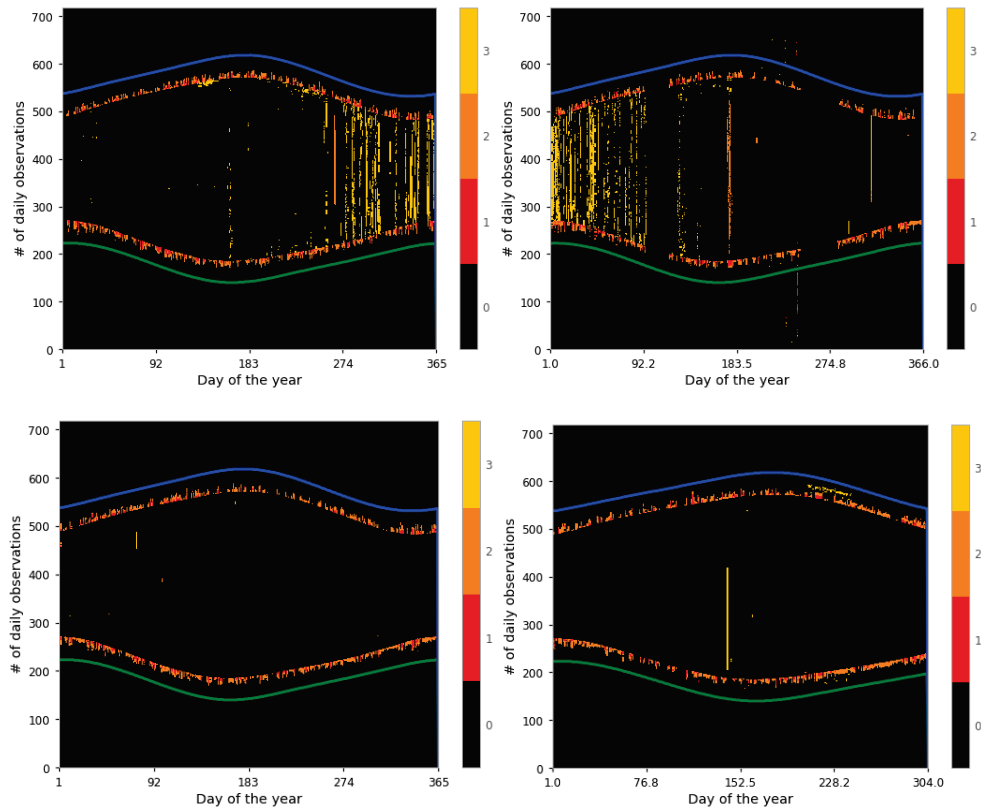


Fig. 6. Gráfico anual dos resultados do controlo de qualidade para os dados de irradiância difusa horizontal do LES-LNEG após aplicação de um fator de correção correspondente ao uso de anel de sombreamento e considerando apenas o teste do rácio da irradiância difusa na fase 3. Do canto superior esquerdo para o canto inferior direito: 2015, 2016, 2017, 2018. Os números correspondem à fase de testes de qualidade, onde 0 corresponde a nenhuma deteção. Crepúsculo civil: matutino - linha verde; vespertino - linha azul.

## CONCLUSÕES

Foi desenvolvida uma aplicação (SIMONEAPP) baseada num script Python para automatização da importação e análise de qualidade de séries temporais de dados de irradiância solar medidos nas instalações do LES-LNEG. Esta aplicação aumentou a velocidade e eficácia com que a tarefa de controlo de qualidade e compilação da informação em base de dados é realizada.

A aplicação foi testada por aplicação à série de dados medidos no LES-LNEG entre 2015 e 2018. Mostrou-se eficaz na deteção de erros de medida de irradiância difusa, sendo os resultados obtidos consistentes com alterações efetuadas no dispositivo de sombreamento do piranómetro usado na medida da irradiância difusa horizontal e com a necessidade de se aplicar um fator de correção aos dados de 2015 e 2016 (obtidos com um anel de sombreamento). Esta aplicação computacional permitiu também a identificação de erros de medida da irradiância direta e de outros erros de medida da irradiância consistentes com os previamente identificados durante a operação regular da estação meteorológica.

Adicionalmente, a metodologia assinalou uma série de potenciais erros entre os 2º e os 19º de altitude solar, cuja natureza será necessário investigar num trabalho futuro.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho integra-se nas Atividades do Projeto de Infraestruturas “INIESC - Infraestrutura Nacional de Investigação em Energia Solar de Concentração” (ALT20-03-0145-FEDER-022113) com financiamento por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) do Programa Operacional Regional do Alentejo e do Programa Operacional Regional de Lisboa.

## NOMENCLATURA

Nome/Quantidade	Símbolo	Unidade	Índice	Símbolo
Ângulo	$\theta$	°	Directa	b
Unidade astronómica	AU	AU	Difusa	d
Baseline Surface Radiation Network	BSRN		Horizontal	h
Irradiância, irradiância global	$G$	W.m <sup>2</sup>	Fora da atmosfera	o
			Solar	s
			Constante solar	SC
			Zenith	z

## REFERÊNCIAS

CM121 - Shading Ring, Instruction Manual, Kipp&Zonen, 2004. URL acedido a 24 de Setembro de 2020: <https://www.kippzonen.com/Download/46/CM121-B-C-Shadow-Ring-Manual>

ISO 9806:2017, Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods.

ISO 9459-2:1995, Solar heating — Domestic water heating systems — Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems.

ISO 9459-5:2007, Solar heating — Domestic water heating systems — Part 5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation.

Karol Bot, Laura Aelenei, Maria da Glória Gomes, Carlos Santos Silva (2020) Performance Assessment of a Building Integrated Photovoltaic Thermal System in Mediterranean Climate—A Numerical Simulation Approach *Energies*, 13, 2887.

Long, C. N., Dutton, E. G (2002). BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. BSRN Technical Report.

Marques, F. et al. (2020). Solar Irradiance (Global, Direct and Diffuse) Quality Control Methodologies Review: Application to Time Series Measured at LES/LNEG, Lisboa, Portugal. Eurosun 2020 Conference Proceedings. In peer review.

Muneer, T., Fairouz, F., 2002. Quality control of solar radiation and sunshine measurements – lessons learnt from processing worldwide databases. *Building Serv. Eng. Res. Technol.* 23,3, 151–166.

The Astropy Collaboration, Thomas P. Robitaille, Erik J. Tollerud, Perry Greenfield, Michael Droettboom, Erik Bray, Tom Aldcroft, et al. «Astropy: A community Python package for astronomy». *Astronomy & Astrophysics* 558 (Outubro de 2013): A33.

The Astropy Collaboration, A. M. Price-Whelan, B. M. Sipőcz, H. M. Günther, P. L. Lim, S. M. Crawford, S. Conseil, et al. «The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package». *The Astronomical Journal* 156, n. 3 (23 de Agosto de 2018): 123.

Tiago Osório, Maria João Carvalho (2013), Testing of solar thermal collectors under transient conditions, *Solar Energy*, Volume 104, June 2014, 71-81.

Younes, S., Claywell, R., Muneer, T., 2005. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. *Energy*. 30(9), 1533-1549.