

# CONTROLE DE QUALIDADE DAS MEDIÇÕES DE IRRADIAÇÃO SOLAR DA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA DO PROJETO HELIOTERM

**Eliziane Gonçalves Arreguy** – eliziane@gmail.com

Bolsista DTI-CNPq/Cepel

**Ana Paula Cardoso Guimarães** – pcardoso@cepel.br

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel)

**Resumo.** Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para a avaliação da qualidade dos dados medidos na estação solarimétrica do projeto Helioterm, a qual está em operação desde julho de 2014 na localidade de Petrolina (PE). Foram estudados os métodos correntes e selecionado o método da WRMC também utilizado pelo INPE. Entretanto, constatou-se que os algoritmos propostos pelo método selecionado não foram capazes de detectar todas as falhas na medição das grandezas solarimétricas, sendo indispensável a avaliação visual para determinação da confiabilidade. Os resultados, de acordo com o modelo aplicado, apresentam uma grande qualidade das medições realizadas pela estação e alta disponibilidade em três anos de operação da mesma.

**Palavras-chave:** Medições solarimétricas, controle de qualidade, irradiação direta normal

## 1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade nas medições de grandezas solarimétricas inicia-se com a seleção da instrumentação e do sistema de aquisição de dados de acordo com os requisitos estabelecidos para o uso dos dados medidos, continua com a sua correta instalação e configuração e inclui o plano de manutenção dos instrumentos e a avaliação crítica dos valores medidos.

Existem várias fontes que podem causar erros e aumentar a incerteza em medições, que vão desde as características e limitações inerentes ao princípio de funcionamento e construção dos equipamentos de medição às condições operacionais.

Segundo Younes, Claywell e Muneer (2005), os erros e problemas com as medições de irradiação solar podem ser categorizados em dois grupos: erros e incertezas dos equipamentos, mais comuns e fáceis de quantificar, e erros e problemas operacionais. As fontes de erros de cada grupo podem ser vistas na Tab. 1.

Tabela 1 - Fontes de erros e incertezas nas medições de irradiação solar

<i>Erros e incertezas dos equipamentos</i>	<i>Erros e problemas operacionais</i>
- Resposta ao cosseno	- Desalinhamento do anel de sombreamento (completo ou parcial)
- Resposta azimutal	- Poeira, orvalho, gotas, dejetos de pássaros, etc.
- Resposta à temperatura	- Nivelamento incorreto
- Seletividade espectral	- Sombreamento por obstáculos no ângulo de visão de céu do sensor
- Estabilidade	- Interferência eletromagnética nos cabos dos sensores
- Não linearidade	- Carga mecânica nos cabos dos sensores
- Desalinhamento do anel de sombreamento	- Desligamento da estação
- Erro de <i>offset</i>	

Fonte: YOUNES, CLAYWELL e MUNEEER (2005)

Uma vez que o sinal foi adquirido e a medição realizada, nada pode ser feito para melhorar sua qualidade. Entretanto, se a avaliação do dado é realizada durante o processo de medição, os erros encontrados podem ser corrigidos para que as medições futuras possuam maior qualidade (WMO, 2005).

Dessa forma, o controle de qualidade em um processo de medição é definido como os procedimentos operacionais executados rotineiramente para garantir seu correto funcionamento. Dele fazem parte a calibração periódica dos instrumentos, as inspeções visuais dos instrumentos de medição, a validação dos dados medidos e as manutenções preventivas (WEBMET, 2014).

Este trabalho trata da validação dos dados medidos pela estação solarimétrica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) no âmbito do Projeto Helioterm, a qual está instalada na cidade de Petrolina em Pernambuco. A estação solarimétrica foi instalada, provisoriamente por meio de um Acordo de Cooperação Técnica, em junho de 2014

em um terreno de propriedade da Embrapa Semiárido, uma vez que a área especificamente destinada à sua implantação não possuía infraestrutura para tal, como apresentada na Fig.1. A estação segue os padrões requeridos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) para medições solarimétricas e meteorológicas que visam a operação de usinas heliotérmicas no país e está constituída por dois piranômetros padrão secundário, um pireliômetro acoplado ao rastreador solar, um medidor eletrônico de brilho solar e todos os outros sensores meteorológicos exigidos. Os dados são adquiridos por um *datalogger* com intervalo de um minuto para posterior tratamento e geração das médias horárias, diárias e mensais.



Figura 1 – Estação meteorológica (a) e detalhe dos instrumentos de medição das grandezas solarimétricas (b).

## 2. VALIDAÇÃO DE DADOS MEDIDOS

A validação dos dados medidos consiste basicamente em sua comparação com valores de referência com o objetivo de qualificá-los em relação à sua confiabilidade. Os dados considerados suspeitos não são descartados, cabendo aos usuários a decisão sobre sua utilização.

Dentre os métodos propostos para controle de qualidade, destacam-se os de Younes, Claywell e Muneer (2005) e aplicado com modificações por Raichijk (2012), utilizados para séries horárias, e também o de Journée e Bertrand, (2011), utilizado para médias de 10 minutos.

O *World Radiation Monitoring Center* (WRMC) adota para avaliar a qualidade dos dados de sua *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) um procedimento de quatro passos sequenciados para avaliar se o valor medido é fisicamente possível, se é um valor extremamente raro, se há consistência entre os valores medidos entre os diferentes sensores e se podem ser comparados a valores provenientes de modelos (WRMC-BSRN, 2017).

Este procedimento é adotado no projeto SONDA (CHAGAS et al., 2006) com algumas modificações conforme disponível no sítio eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017). Os algoritmos propostos pela WRMC e utilizados pelo INPE são muito apropriados para avaliação em tempo quase real de dados com curto intervalo de aquisição. O resultado da avaliação com uso de três critérios gera um código numérico, conforme a convenção da Tab. 2, que é gravado em um arquivo distinto ao arquivo da medição. O resultado da análise pode ser apresentado de forma gráfica para informação visual sobre a qualidade dos dados adquiridos em um determinado período. Exemplos com possíveis códigos e sua forma de leitura podem ser vistos na Fig. 2. Este foi o método adotado para a avaliação dos dados medidos pela estação do Projeto Helioterm.

Tabela 2 - Código numérico INPE.

Número	Significado
0	nenhum procedimento foi executado
2	dado suspeito de ser incorreto
5	procedimento não pode ser executado
9	dado de boa qualidade ou não suspeito

Fonte: INPE, 2017

9	9	9	< Início da leitura	2	9	9	< Início da leitura	5	5	2	< Início da leitura
			Algoritmo 1: aprovado, não suspeito				Algoritmo 1: aprovado, não suspeito				Algoritmo 1: suspeito, pode estar incorreto
			Algoritmo 2: aprovado, não suspeito				Algoritmo 2: aprovado, não suspeito				Algoritmo 2: procedimento não pode ser executado
			Algoritmo 3: aprovado, não suspeito				Algoritmo 3: suspeito, pode estar incorreto				Algoritmo 3: procedimento não pode ser executado

Figura 2 - Exemplos de códigos para validação dos dados solarimétricos com três critérios de avaliação. Fonte: INPE, 2017

As três grandezas avaliadas são a irradiação global horizontal  $GHI$ , a irradiação difusa horizontal  $DHI$  e a irradiação direta normal  $DNI$ . Os critérios e os limites são:

- o dado medido é “fisicamente possível”? Para isso, o valor da constante solar ajustada para a distância Terra-Sol ( $S_a$ ), ou seja, a irradiação que chega ao topo da atmosfera, sem nenhuma interferência de nuvens e partículas e os valores do cosseno do ângulo zenital solar ( $\mu_0$ ) são utilizados na análise. Em outros termos, o valor medido é comparado ao valor máximo possível em condições ideais.

$$\begin{aligned} -4 \text{ Wm}^{-2} < GHI < S_a \times 1,5 \times \mu_0^{1,2} + 100 \text{ Wm}^{-2} \\ -4 \text{ Wm}^{-2} < DHI < S_a \times 0,95 \times \mu_0^{1,2} + 50 \text{ Wm}^{-2} \\ -4 \text{ Wm}^{-2} < DNI < S_a \end{aligned}$$

- o dado medido é “extremamente raro”? Apesar de fisicamente possível, os valores estão dentro de um limite considerado normal?

$$\begin{aligned} -2 \text{ Wm}^{-2} < GHI < S_a \times 1,2 \times \mu_0^{1,2} + 50 \text{ Wm}^{-2} \\ -2 \text{ Wm}^{-2} < DHI < S_a \times 0,75 \times \mu_0^{1,2} + 30 \text{ Wm}^{-2} \\ -2 \text{ Wm}^{-2} < DNI < S_a \times 0,95 \times \mu_0^{0,2} + 10 \text{ Wm}^{-2} \end{aligned}$$

- há “consistência” entre os dados medidos por vários sensores? Os valores obtidos para a grandeza a partir de cálculo com as medições das demais e os valores medidos são coerentes? Neste caso, o ângulo zenital solar ( $\theta$ ) precisa ser levado em consideração para determinação dos limites aceitáveis.

$$\begin{aligned} 0,90 < GHI/(DHI+DNI\mu_0) < 1,10 \text{ para } \theta < 75^\circ \text{ e } (DHI+DNI\mu_0) > 50 \text{ Wm}^{-2} \\ 0,85 < GHI/(DHI+DNI\mu_0) < 1,15 \text{ para } 75^\circ < \theta < 93^\circ \text{ e } (DHI+DNI\mu_0) > 50 \text{ Wm}^{-2} \\ DHI/GHI < 1,05 \text{ para } \theta < 75^\circ \text{ e } GHI > 50 \text{ Wm}^{-2} \\ DHI/GHI < 1,10 \text{ para } 75^\circ < \theta < 93^\circ \text{ e } GHI > 50 \text{ Wm}^{-2} \\ \text{Para } GHI < 50 \text{ Wm}^{-2} \text{ o teste não é possível.} \\ DNI\mu_0 - 50 \text{ Wm}^{-2} \leq (GHI - DHI) \leq DNI\mu_0 + 50 \text{ Wm}^{-2} \end{aligned}$$

### 3. RESULTADOS

Os dados da estação solarimétrica são gravados no intervalo de um minuto. A Fig. 3 mostra um exemplo de medição de um dia de céu claro (Fig. 3a) e de um dia de céu encoberto (Fig. 3b).

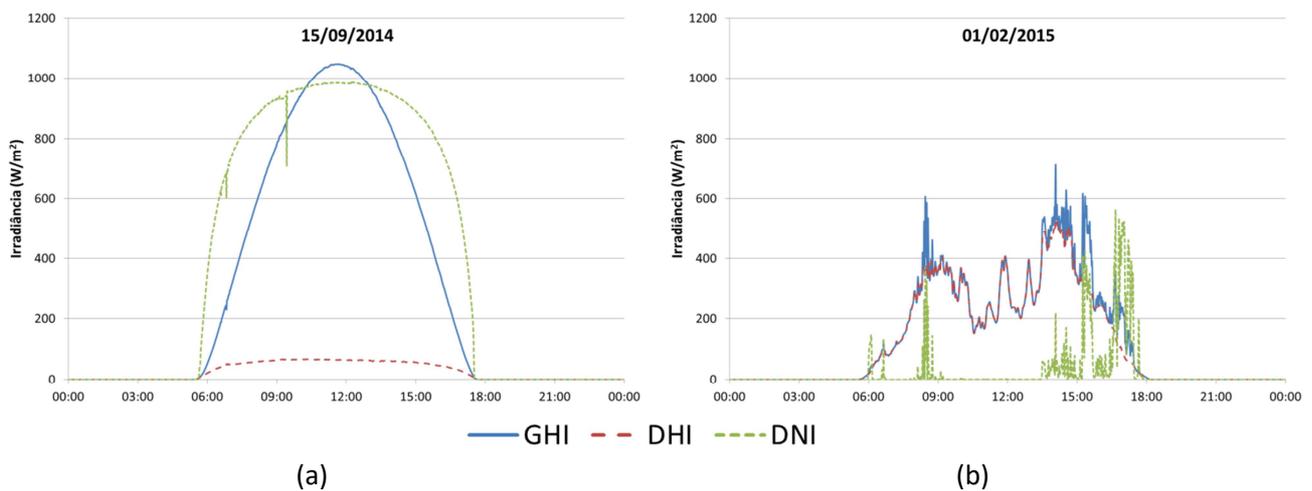


Figura 3 – Exemplo de dados medidos pela estação solarimétrica em um dia de céu claro (a) e de céu encoberto (b).

Os cálculos relativos aos critérios de avaliação foram realizados e aplicados aos dados brutos e os resultados foram gravados em arquivo.

Foi detectado que, para a configuração dos instrumentos de medição presentes na estação, quando há falha no rastreador solar, as medições referentes à irradiação direta normal e à irradiação difusa são prejudicadas, pois os critérios não são capazes de identificar o erro. Este fato pode ser evidenciado no mês de outubro de 2015, nos dias 2, 5, 18, 22 e nas manhãs dos dias 24, 26, 27, 28, 29 e 30/10/2015, conforme mostram as Figs. 4, 5 e 6. Nestes gráficos, nos dias e horários mencionados, percebe-se um alto valor de  $GHI$  e  $DHI$ , e valores muito baixos, próximos de zero, para  $DNI$ .

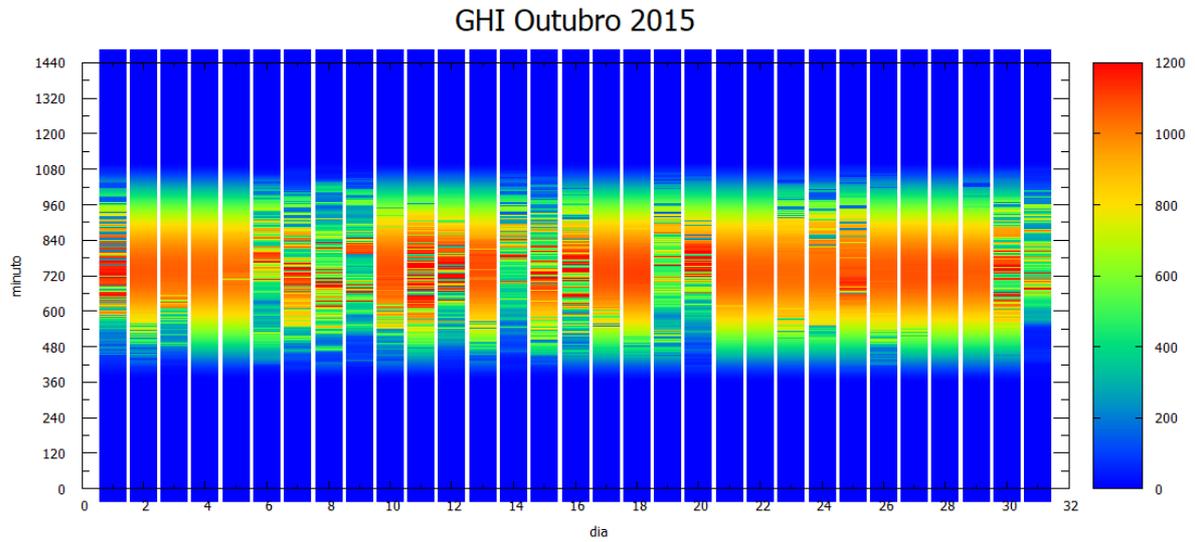


Figura 4 - Valores de *GHI* medidos no mês de outubro de 2015.

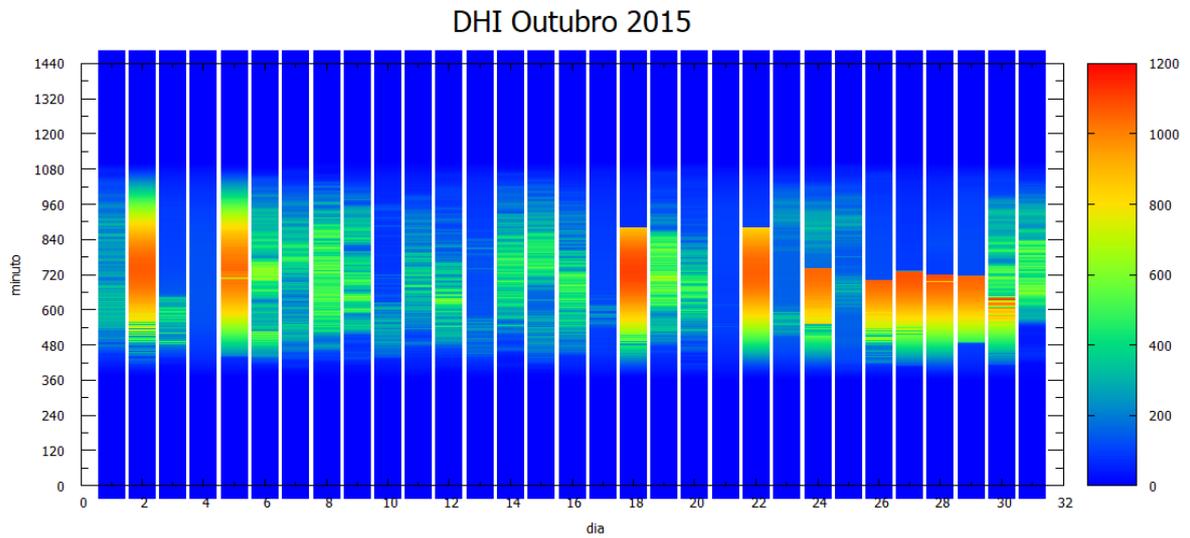


Figura 5 - Valores de *DHI* medidos no mês de outubro de 2015.

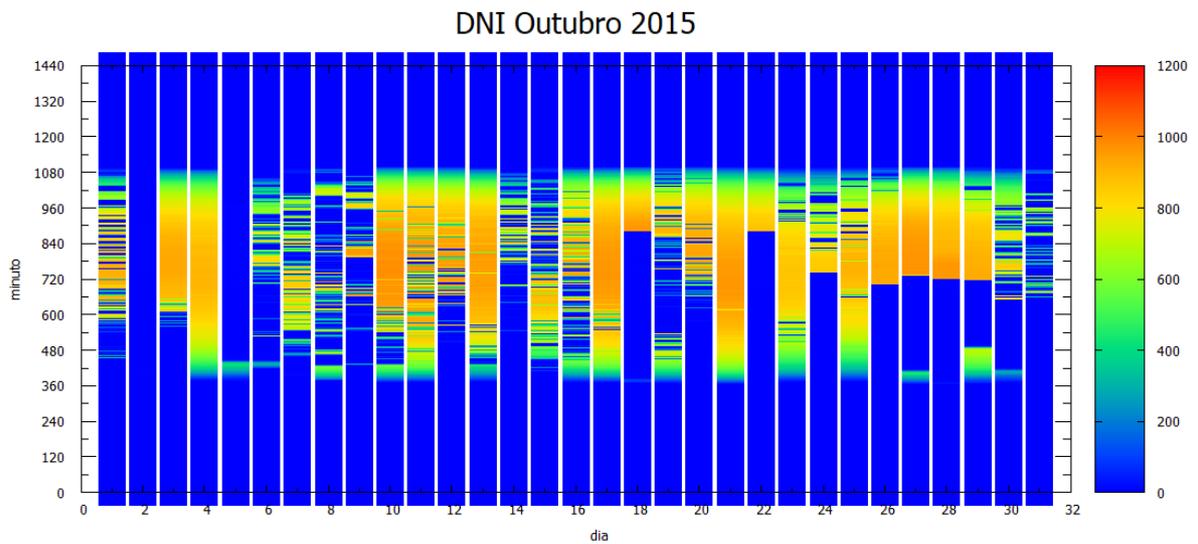


Figura 6 - Valores de *DNI* medidos no mês de outubro de 2015.

Entretanto, observa-se que, no controle de qualidade, nem todos os intervalos com valores suspeitos foram detectados, principalmente aqueles referentes aos da irradiação direta normal. As Figs. 7, 8 e 9 mostram em verde os dados considerados bons e em vermelho os dados considerados suspeitos. Enquanto as medidas de *GHI* não apresentam nenhum dado suspeito (Fig. 7), as medidas relativas à *DHI* (Fig. 8) apresentam dados suspeitos em diferentes dias, mas não em todos os dias em que a *DHI* apresenta valores elevados em comparação com a *GHI* (Figs. 4 e 5). Como exemplo, no dia 05/10/2015, os valores de *GHI* e de *DNI* são similares, na faixa de  $800\text{Wm}^{-2}$  a  $1000\text{Wm}^{-2}$  e neste dia nenhum dado foi considerado suspeito. Já em relação às medidas de *DNI* (Fig. 9), a falha do rastreador solar não é detectada pelos critérios de avaliação da qualidade dos dados e todos são considerados confiáveis.

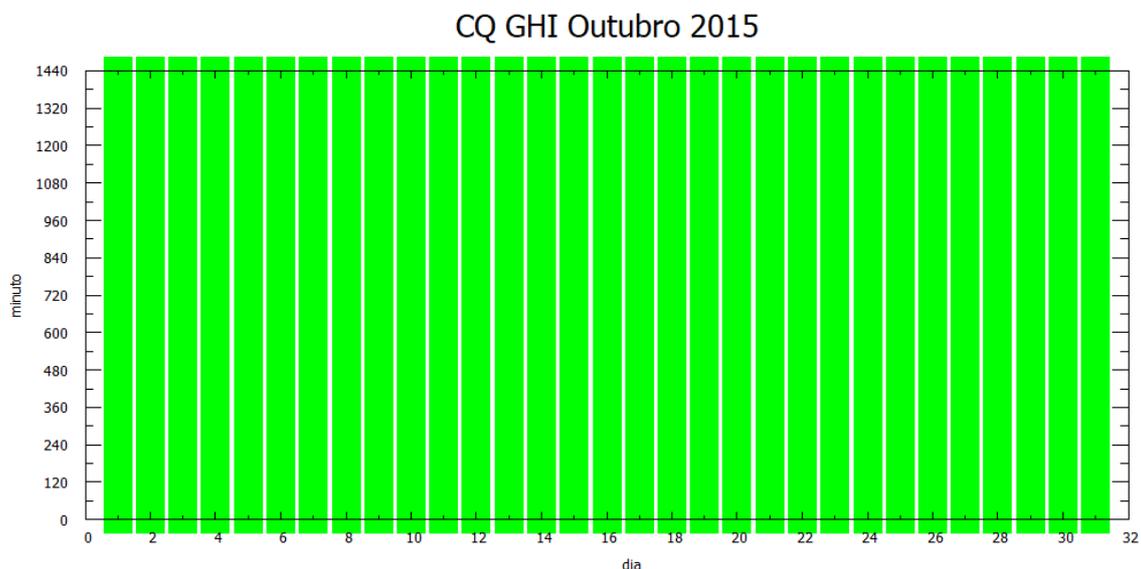


Figura 7 - Controle de qualidade para *GHI* medida pela estação para o mês de outubro de 2015. Todos os dados foram aprovados nos critérios.

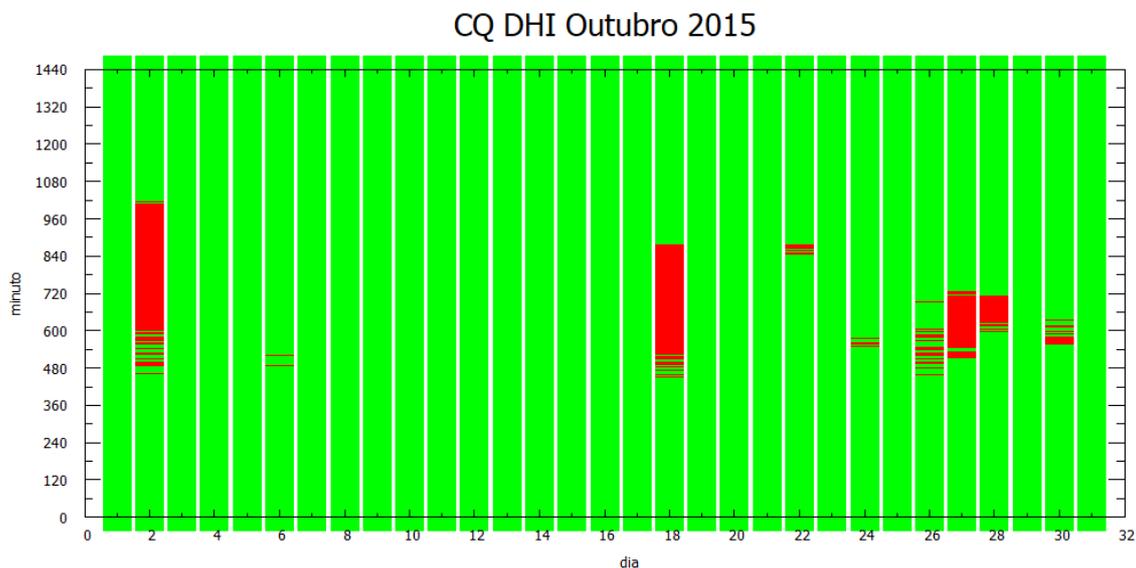


Figura 8 - Controle de qualidade da *DHI* medida pela estação para o mês de outubro de 2015. Os dias 2, 18, 22 e as manhãs dos dias 24, 26, 28 e 30/10/2015 dados suspeitos, mas os dias 5, 27 e 29 não têm dados considerados suspeitos.

### CQ DNI Outubro 2015

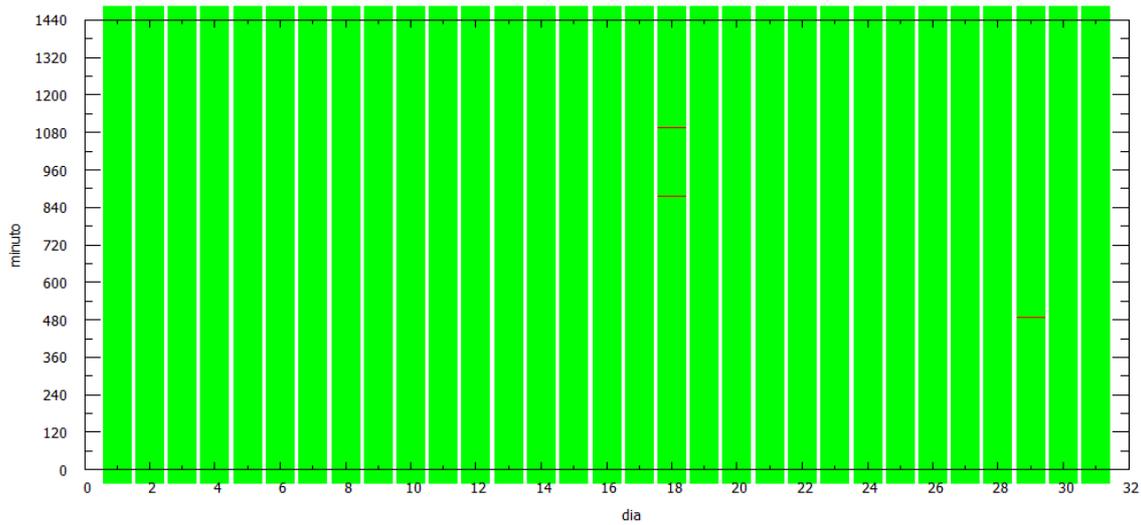


Figura 9 - Controle de qualidade da DNI medida pela estação para o mês de outubro de 2015. Poucos dados foram considerados suspeitos.

Dessa forma, o procedimento para avaliar tais situações foi a inspeção visual dos dados medidos e a verificação do funcionamento correto do rastreador solar (onde estão acoplados esfera de sombreamento e pireliômetro). A Fig. 10 mostra os gráficos utilizados para esta inspeção visual, sendo apresentado um dia com medições coerentes (Fig. 10a) e dias com dados incoerentes apesar da aprovação nos filtros de controle de qualidade (Fig. 10b, c e d). Os dados dos intervalos suspeitos foram considerados perdidos, somando-se aos períodos em que houve falha da estação e não houve medição.

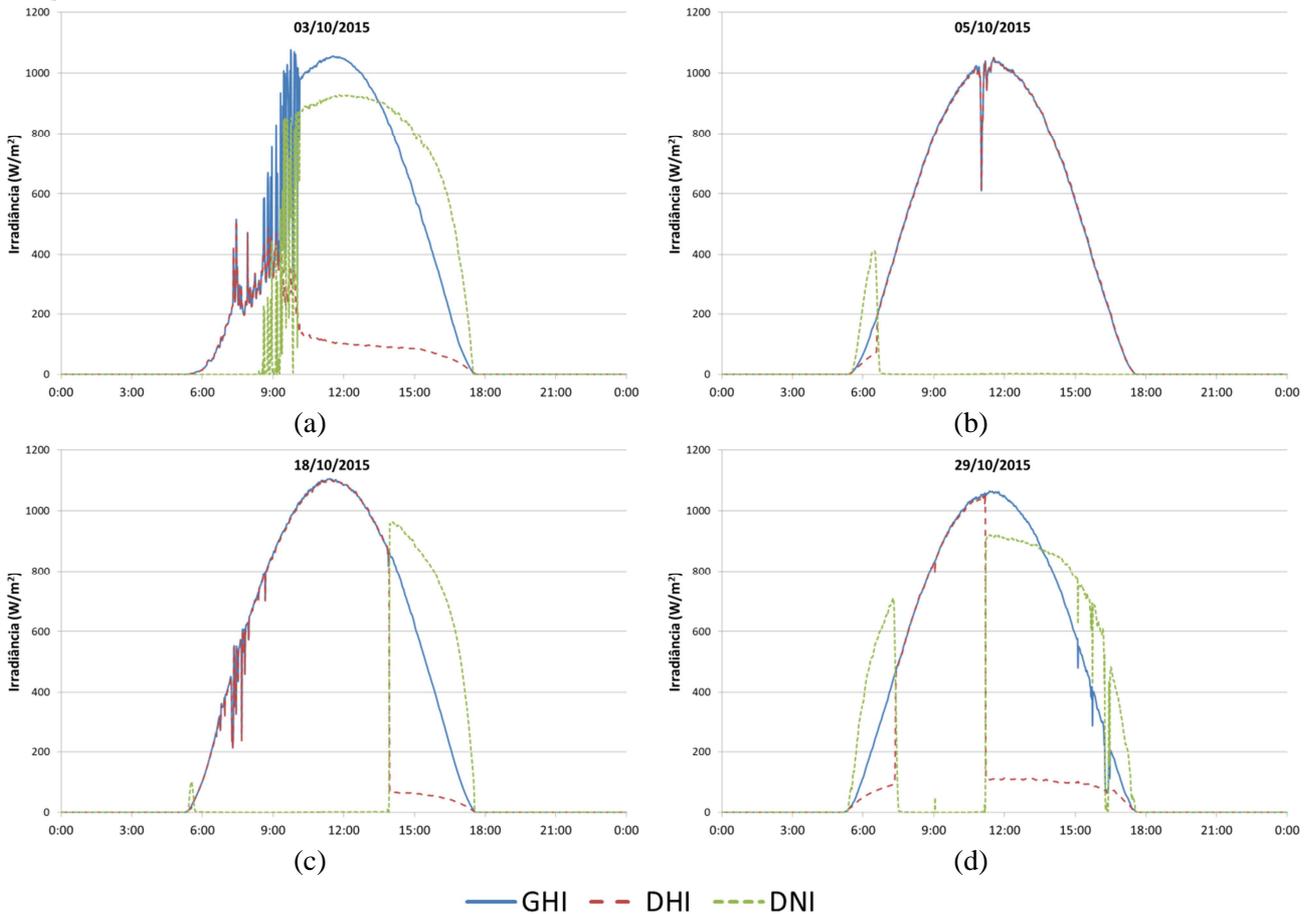


Figura 10 – Dados medidos de irradiação em um dia considerado normal (a) e em dias com dados suspeitos de acordo com a inspeção visual (b, c e d).

Os resultados do controle de qualidade para *GHI* são mostrados na Fig. 11. Tem-se que 98,5% dos dados medidos nos 36 meses apresentados são confiáveis e há apenas perdas de medição nos meses de março e abril de 2017 (Fig. 11c), correspondendo a 16,1% e 43,2% dos dados dos respectivos meses, 4,9% dos dados do ano. Em abril, as falhas foram intermitentes e o maior período sem coleta de dados foi de nove dias consecutivos.

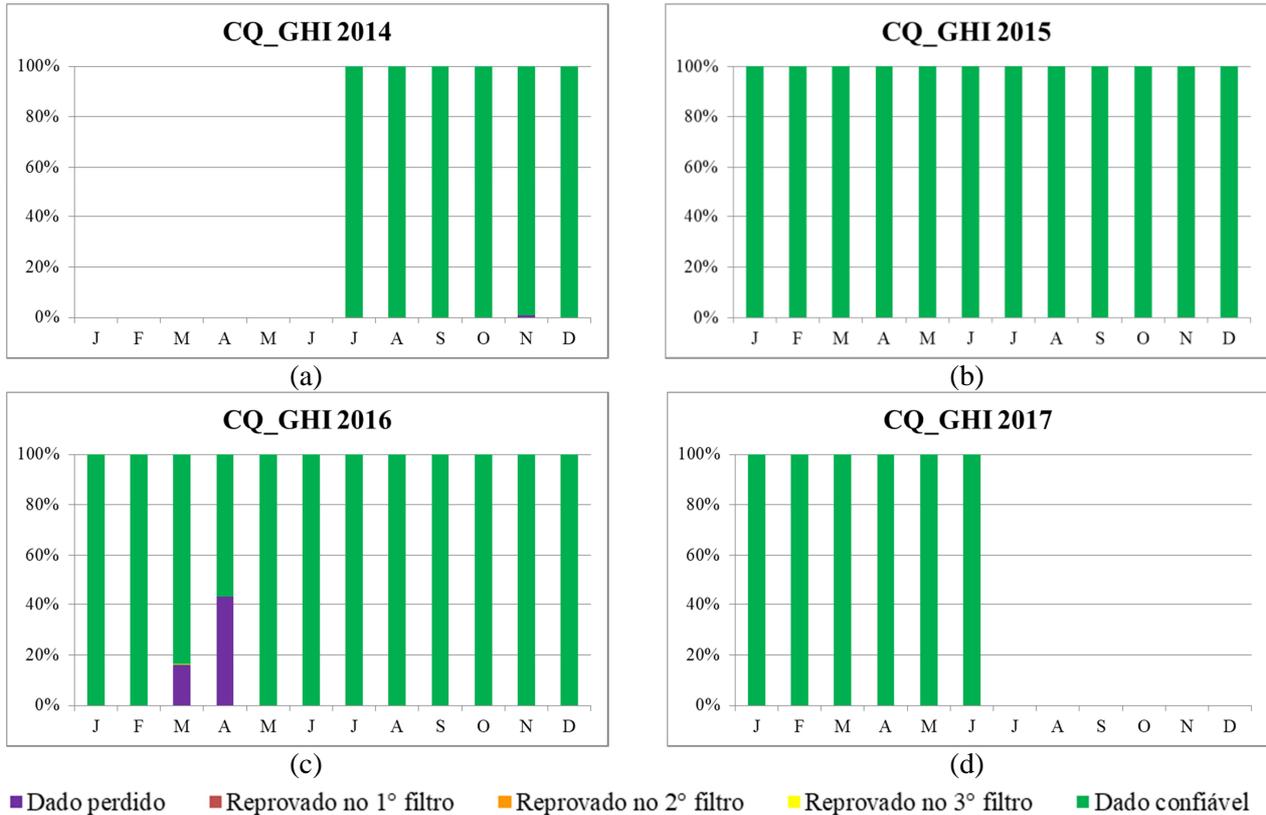
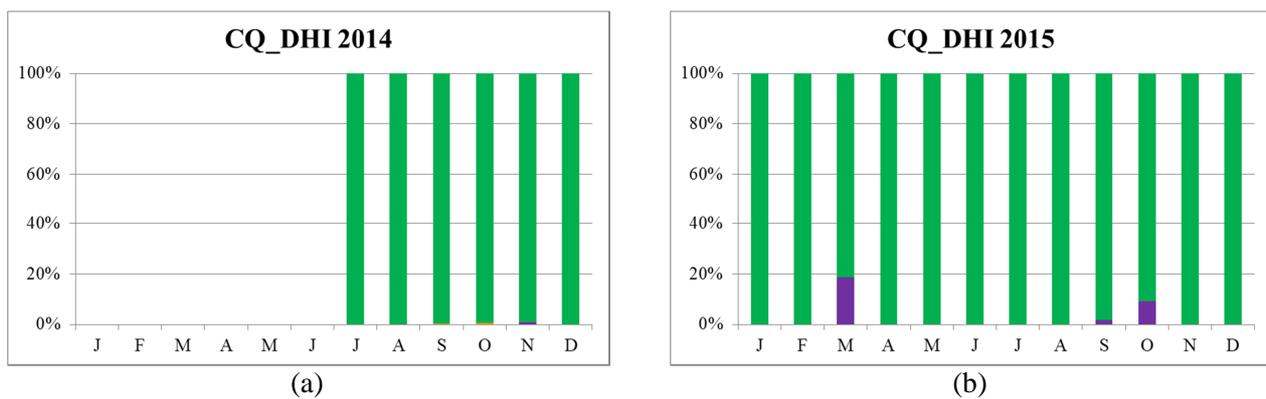


Figura 11 – Resultado da validação dos dados para as medições de irradiação global horizontal para os dados medidos em 2014, 2015, 2016 e 2017.

Os resultados do controle de qualidade para *DHI* são mostrados na Fig. 12. O percentual de dados confiáveis segundo os critérios estabelecidos é de 97,4%, e além das perdas de dados detectadas em 2016, em comum com a *GHI*, em 2015 há episódios de perdas de dados pela falha na esfera de sombreamento detectada visualmente nos meses de março, setembro e outubro de 2015 (Fig. 12b), correspondentes a 18,8%, 1,7% e 9,1% dos dados de cada mês e 2,5% do total dos dados medidos no ano.



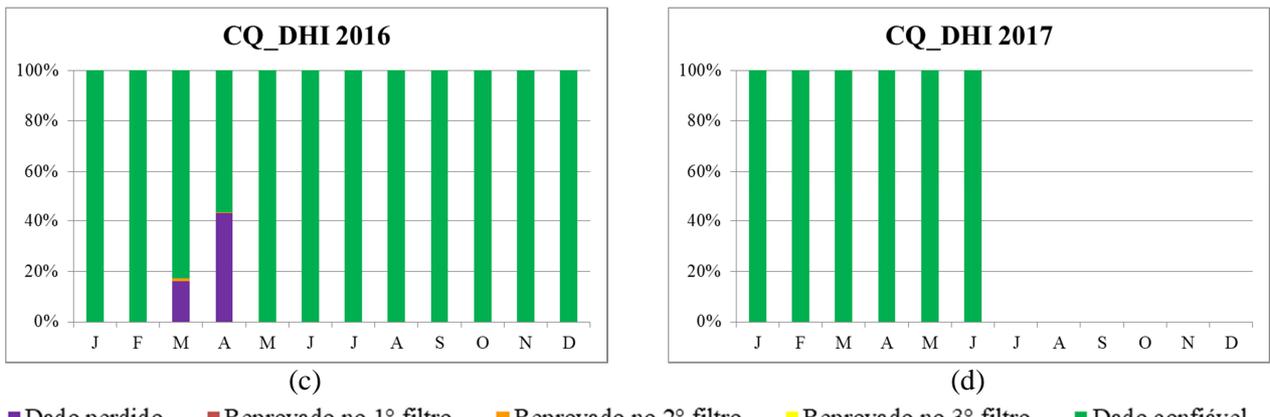


Figura 12 – Resultado da validação dos dados para as medições de irradiação difusa horizontal para os dados medidos em 2014, 2015, 2016 e 2017.

Por fim, os resultados do controle de qualidade para *DNI* são mostrados na Fig. 13. O percentual de dados confiáveis é de 97,5%, similar aos observados em *DHI* por falha no sombreamento, sendo que o equipamento do rastreador do pireliômetro é o mesmo do dispositivo sombreador.

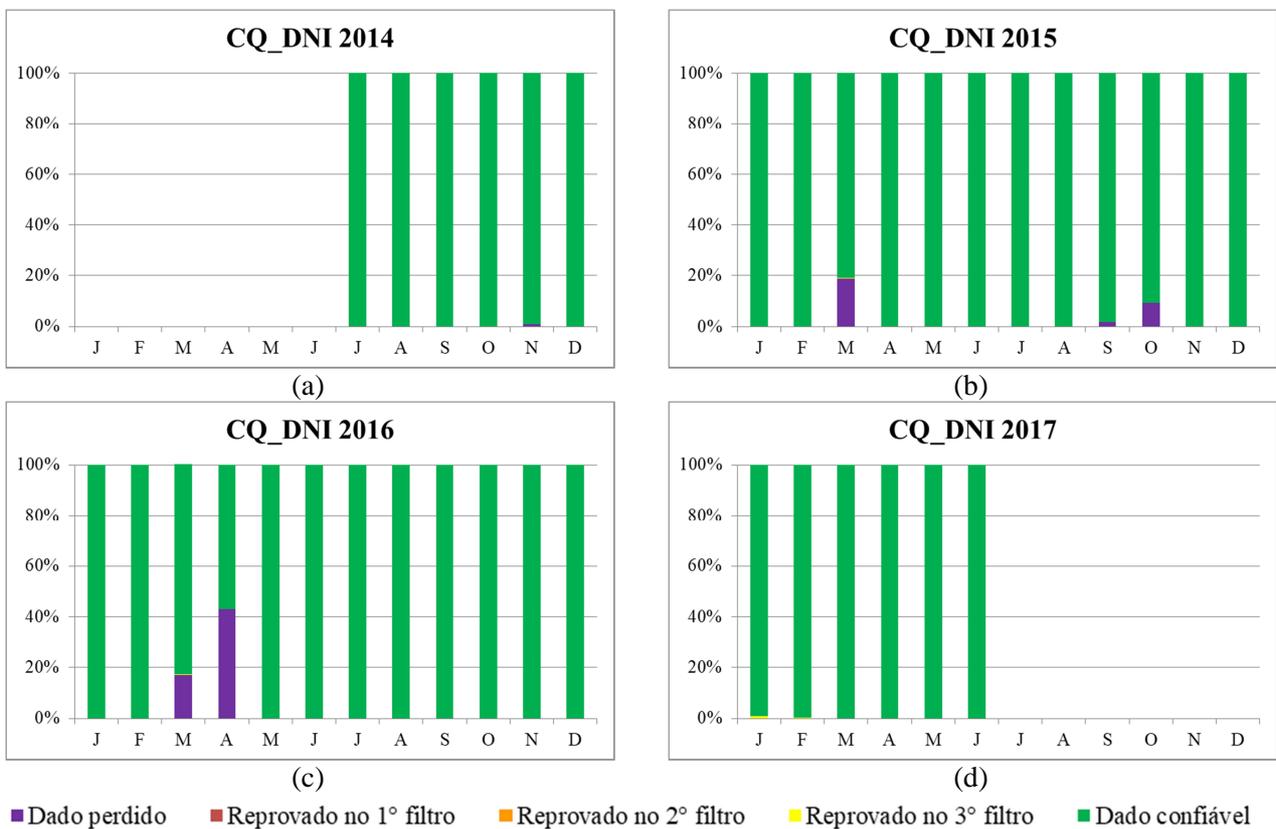


Figura 13 – Resultado da validação dos dados para as medições de irradiação direta normal para os dados medidos em 2014, 2015, 2016 e 2017.

#### 4. CONCLUSÕES

Os critérios estabelecidos no modelo da WRMC para avaliação da qualidade dos dados medidos de irradiação global, difusa e direta normal foram aplicados aos dados da estação solarimétrica do Projeto Helioterm e os resultados, dentro dos critérios estabelecidos, mostraram confiabilidade acima de 97,4% para os 36 meses de medição, apresentando baixo índice de dados suspeitos.

Entretanto, foi constatado que tais critérios não são capazes de detectar as falhas do rastreador solar, as quais comprometem as medidas da irradiação difusa e da irradiação direta normal. Como os dois dispositivos utilizam o mesmo mecanismo para movimentar a esfera de sombreamento e o rastreador do pireliômetro, quando o mecanismo não funciona as duas medições são comprometidas e o filtro que realiza a coerência das medições entre sensores é

incapaz de detectar a incoerência em duas medições simultâneas. Para garantir a qualidade efetiva dos dados, foi necessário incluir uma etapa de inspeção visual das medições, e os dados considerados comprometidos foram classificados como dados “perdidos”.

Ainda assim, percebe-se a alta qualidade das medições realizadas de acordo com os critérios adotados internacionalmente e a baixa indisponibilidade dos dados medidos pelo período de três anos de operação da estação, sendo a maior perda anual de 4,9% das medições.

O acompanhamento diário da operação da estação, bem como a análise e o tratamento dos dados de maneira contínua e por pessoal qualificado contribuem para o funcionamento adequado dos sensores em questão e a confiabilidade das medições.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Embrapa Semiárido que em parceria com o Cepel, através de um Acordo de Cooperação Técnica, coordena a operação e a manutenção da estação solarimétrica do projeto Helioterm.

### **REFERÊNCIAS**

- Chagas, R. C. et al, 2006. Procedimentos de Validação de Dados de Radiação Solar da Rede Estações do Projeto SONDA. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-d019817fa29f38d4a52c8d88e7150f4d.pdf>>. Acesso em 19 de nov. de 2014.
- INPE, 2017. Validação dos dados. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html#criterios>>. Acesso em: 25 de out. de 2017.
- Journée, M.; Bertrand, C, 2011. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. Solar Energy, v. 85, p. 72-86. Disponível em <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em 13 de out. de 2014.
- Raichijk, C, 2012. Control de Calidad de Mediciones de Radiación Solar. Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente, v. 12. Disponível em: <[http://www.gersol.unlu.edu.ar/trabajos/678\\_CONTROL%20DE%20CALIDAD%20DE%20MEDICIONES%20DE%20RADI.pdf](http://www.gersol.unlu.edu.ar/trabajos/678_CONTROL%20DE%20CALIDAD%20DE%20MEDICIONES%20DE%20RADI.pdf)>. Acesso em: 01 de out. de 2014.
- WEBMET, 2014. Quality Assurance and Quality Control. Disponível em: <[http://www.webmet.com/met\\_monitoring/86.html](http://www.webmet.com/met_monitoring/86.html)>. Acesso em: 18 de nov. de 2014.
- WMO, 2005. Baseline Surface Radiation Network - Operations Manual.
- WRMC-BRSN, 2017. Quality Checks. Disponível em: <<http://bsrn.awi.de/data/quality-checks/>>. Acesso em 29 de out. de 2017.
- Younes, S.; Claywell, R.; Muneer, T, 2005. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. Energy, v. 30, n. 9, p. 1533-1549. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544204002233>>. Acesso em 18 de nov. de 2014.

### **QUALITY CONTROL OF SOLAR IRRADIATION MEASUREMENTS OF THE HELIOTERM PROJECT SOLAR STATION**

**Abstract.** *The objective of this work is to present the methodology used to evaluate the quality of measured data at the Helioterm solar station, which has been in operation since July 2014 in Petrolina (PE). The current methods were studied and the WRMC method also used by INPE was selected. However, it was observed that the algorithms proposed by the selected method were not able to detect all the failures in the measurement of the solar data, being indispensable the visual inspection to determine its reliability. The results, according to the applied model, present a high quality of measurements made by the station and high availability in three years of operation.*

**Key words:** *solar data measurement, quality control, direct normal irradiation*