

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE REPARAÇÃO DE MÓDULOS FOTVOLTAICOS *ON SITE*****Fialho L.\*, Duarte D.\*, Pires C.\*, Horta P.\***

\* Cátedra Energias Renováveis, Universidade de Évora, Casa Cordovil, Rua D. Augusto Eduardo Nunes nº7, Évora, 7000-651, Portugal, [lafialho@uevora.pt](mailto:lafialho@uevora.pt)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.3.2157>

**RESUMO**

Os módulos fotovoltaicos podem desenvolver alguns defeitos durante a operação contínua ao longo do seu tempo de vida. Alguns desses defeitos não apresentam um risco acrescido inicial, mas podem evoluir gradualmente para uma falha perigosa, refletindo-se numa redução na produção de eletricidade, paragens imprevistas e constituir um risco pessoal ou para a instalação. Estes defeitos podem ser reparados na sua fase inicial de modo a minimizar perdas de produção no módulo fotovoltaico e também evitar a sua perda total. Assim, a reparação apresenta-se como uma solução para recuperar módulos com falhas (pontos quentes), com resultados satisfatórios e podendo reduzir os custos associados à sua manutenção. No âmbito do projeto GRECO foi desenvolvido um processo de reparação compatível com módulos de modelos antigos, superando a dificuldade que apresenta a sua substituição por um novo módulo. Os resultados dos ensaios e validação deste processo de reparação apresentam resultados positivos, mantendo as características de segurança e fiabilidade do módulo reparado, em condições reais de operação outdoor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Solar Fotovoltaica, Reparação, Módulos Fotovoltaicos, Degradação, GRECO

**ABSTRACT**

Photovoltaic modules can develop some defects during their continuous operation over their lifetime. Some of these defects may not present an initial increased risk, but they may gradually evolve into a dangerous failure, reflecting a reduction in electricity production, unforeseen stops and constitute a personal or installation risk. These defects can be repaired in their initial phase in order to minimize production losses in the photovoltaic module and also to avoid their total loss. Thus, the repair presents itself as a solution to recover modules with failures, with satisfactory results and enabling system maintenance cost reductions. In the scope of project GRECO a repair process has been developed in compatibility with old modules, overcoming the difficulty of replacing them with a new PV module. The results of the tests and validation of this repairing process show positive results, maintaining the safety and reliability characteristics of the repaired module, in real conditions of outdoor operation.

**KEYWORDS:** Photovoltaic Solar Energy, Repairing, Photovoltaic Modules, Degradation, GRECO

## INTRODUÇÃO

Os módulos fotovoltaicos com falhas levam a rendimentos mais baixos das suas centrais fotovoltaicas, uma menor produção de energia e podem colocar riscos adicionais à instalação fotovoltaica.

A reparação dos módulos fotovoltaicos (PV) levanta uma questão relativamente simples: porque devemos reparar os módulos fotovoltaicos em vez de os substituir? Esta questão é facilmente respondida com a mudança drástica na evolução dos módulos tanto a nível das suas características físicas (por exemplo, as suas dimensões), como elétricas (corrente, tensão, etc.). Os modelos de módulos fotovoltaicos atuais são distintos de módulos instalados há 10 ou 20 anos e, por esta razão, pode tornar-se mais fácil proceder à sua reparação. Deve também ter-se em conta que numa central fotovoltaica com alguns anos de idade podem não existir módulos de reserva suficientes para proceder à substituição de todos os módulos defeituosos. Um procedimento de reparação de alguns tipos de defeito restaura a segurança de funcionamento da central fotovoltaica da mesma forma que uma substituição.

As reparações de alguns tipos de defeitos podem ser realizadas *off-site* e são geralmente concluídas em duas a três semanas (SecondSol, 2020) (Rayotec, 2020), podendo os painéis solares ser reintegrados na instalação após a reparação. As reparações no local (on-site) podem demorar um a dois dias (tomando em consideração o tempo de cura de alguns processos) e proporcionam a solução mais rápida após a deteção do defeito, minimizando os tempos de paragem da instalação e os custos de logística relacionados com o método de reparação *off-site* (sendo frequentemente remotos os locais das centrais fotovoltaicas) e, assim, minimizar as consequentes perdas na produção de energia.

A gestão cuidadosa desta via de reparação on-site de módulos fotovoltaicos pode levar assim a poupanças significativas nos custos de Operação e Manutenção (O&M), melhorando o desempenho técnico-económico dos sistemas.

A deteção de falhas em módulos fotovoltaicos é um procedimento que requer mão-de-obra qualificada e equipamento técnico, como câmaras térmicas IR, câmaras de eletroluminescência, traçadores de curvas I-V, sensores de corrente DC, testadores de isolamento, multímetros, etc. Normalmente, um módulo defeituoso é localizado após algumas horas de testes no local e a duração real para executar uma reparação de um módulo on-site depende do tipo de defeito, tamanho da instalação, dificuldade de acesso, clima, etc. (SolarPower Europe, 2019).

Entre os vários tipos de defeitos que podem ocorrer nos módulos fotovoltaicos foi selecionada para apresentação neste trabalho a falha relacionada com problemas na soldadura de *busbars* nas células fotovoltaicas ou células com micro rachas/rachas, que originam frequentemente pontos quentes.

O estado da arte da literatura (Jordan, Silverman, Wohlgemuth, Kurtz, & Kaitlyn, 2017) (Jordan, Kurtz, VanSant, & Newmiller, 2016) (Woodhouse, Walker, Fu, Jordan, & Kurtz, 2019) (IEA, 2014) sobre este tema reporta uma média de falhas de 1.25%/ano em módulos fotovoltaicos de silício cristalino, devido a pontos quentes (células com rachas/partidas ou falhas de soldadura).

Normalmente numa fase inicial este tipo de falhas não é detetável a olho nu. Nesse caso, também não reduzem drasticamente a potência, a menos que o módulo PV tenha muitas células danificadas com uma grande área fotovoltaica não ativa ou a falha de soldadura resultar num aumento substancial da resistência de contato. Mas, se algum destes problemas piorar podem evoluir para pontos críticos no módulo. Na verdade, são frequentemente a origem de um *hot-spot* (ponto quente), em particular as falhas de soldadura, e tendem a evoluir muito rapidamente. Quando surge o ponto quente, pode ser facilmente detetado com uma câmara termográfica e, por vezes, até mesmo com inspeção visual. Quando encontrados num estágio inicial, o seu impacto na produção de eletricidade será baixo e o risco de dano definitivo do módulo fotovoltaico é evitado com a sua reparação. Neste trabalho apresenta-se o processo de reparação on-site e a sua validação.

Também é possível reparar outro tipo de falhas de módulos fotovoltaicos como, por exemplo, falhas nos díodos de bypass ou falhas de isolamento elétrico (IEA, 2014) (Ulrike, et al., 2018). O trabalho e resultados apresentados neste artigo foram desenvolvidos no âmbito do projeto H2020 GRECO (GRECO, s.d.), onde também se desenvolveu e validou a reparação destas falhas.

Em falhas de díodos de bypass, em geral a sua tendência é entrar em curto-circuito quando se verifica algum defeito. Nesse caso a corrente que flui por este díodo provoca o seu aquecimento e leva a uma perda da potência de todas as células protegidas por esse díodo, que aquece uma vez que as células estão em curto-circuito. Se este díodo danificado for substituído por um díodo operacional, toda a potência do módulo é recuperada e não há diferenças de temperatura dentro do módulo PV. Por vezes, apesar de anormal, um díodo em estado de condução e aquecimento permanentes, leva à falha do mesmo, tornando-se um circuito aberto, neste caso deve-se proceder com a substituição do mesmo.

Podem também encontrar-se falhas de isolamento do módulo fotovoltaico, nomeadamente corrente de fuga através da borda externa do referido módulo. Este tipo de falha pode ser detetado pelo próprio inversor da instalação fotovoltaica uma vez que este é um elemento sensível ao valor da resistência de isolamento, que deve permanecer dentro de um intervalo de valores. Caso viole esta condição da resistência de isolamento, a injeção de energia na rede é interrompida uma vez que estamos perante um defeito perigoso. O isolamento dos módulos fotovoltaicos pode ser repostado ou melhorado por colas de vidro líquido (nanopartículas de SiO<sub>2</sub> em resina epóxi com o mesmo índice de refração do vidro frontal), sendo um processo simples e podendo ser realizado *on-site*.

## PROCEDIMENTO DE REPARAÇÃO

Na reparação de módulos fotovoltaicos com células rachadas, totalmente danificadas, com problemas de soldadura nos contactos metálicos ou com *hot-spots*, a reparação fundamental passa por fazer um *bypass* da célula defeituosa, de acordo com a seguinte sequência:

- Identificação e marcação da célula defeituosa;
- Identificação de todo o material e equipamento necessário para realizar a reparação;
- Limpeza da área de reparação com álcool isopropílico para remover as impurezas e sujidade do local;
- Corte e remoção do *backsheet*, de forma a poder aceder aos contactos metálicos da célula. Os cortes feitos devem ser limitados ao tamanho suficiente para aceder aos contactos e deve tomar-se especial atenção em não danificar a célula adjacente à defeituosa;
- Soldadura da *PV ribbon* nos contactos metálicos de forma a efectuar o *bypass* da célula defeituosa, garantindo área de contacto suficiente para a corrente máxima;
- Depois do *bypass* realizado, o corte é preenchido com silicone neutro de forma a melhorar o isolamento da reparação.
- Por fim, cola-se uma folha de *Tedlar* adesivo por cima da zona de reparação de forma a garantir o isolamento e durabilidade da reparação. Deve-se tomar-se especial atenção à colocação do *Tedlar* de forma a não permitir a criação de bolhas de ar e permitir uma margem de sobreposição ao *backsheet* existente de, no mínimo, 5 cm em volta do corte.

Deve proceder-se a limpeza cuidadosa entre passos, utilizando álcool isopropílico puro.

Imagens dos passos mencionados acima podem ser observadas na Fig. 1, bem como um diagrama simplificado do processo em cada passo. Este tipo de reparação demora cerca de 30 minutos a ser realizado por um operador, ou seja, cerca de 10 minutos/busbar a soldar. A maior experiência do operador levará à redução da duração deste processo de reparação.

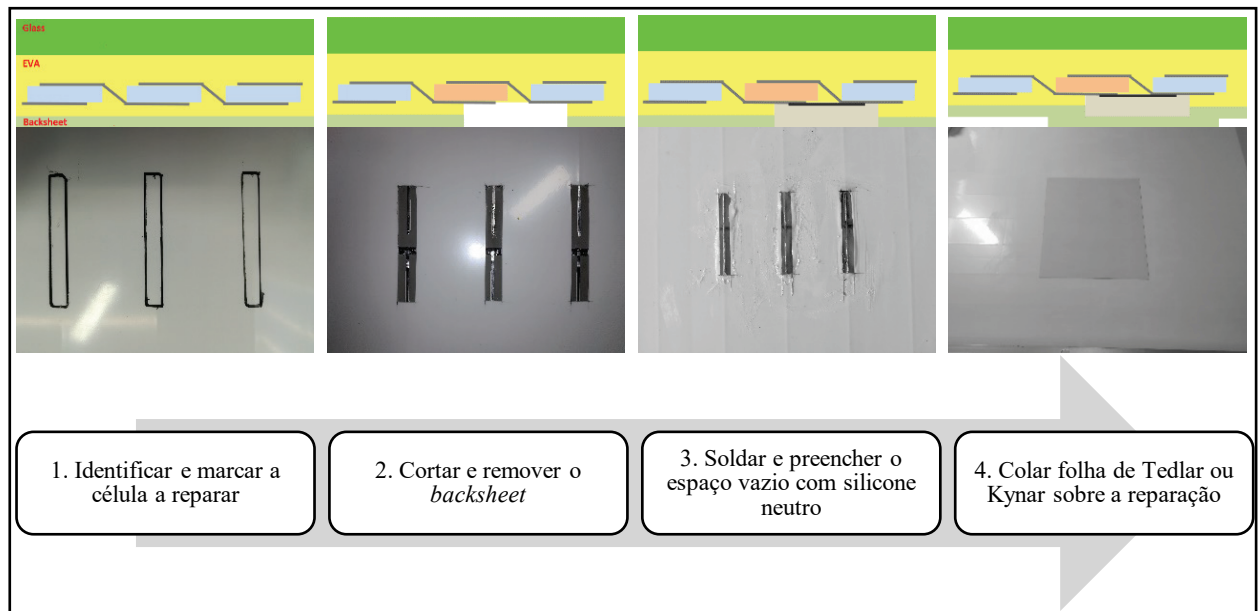


Fig. 1. Principais passos do procedimento de reparação de pontos quentes

## PROCEDIMENTO DE ENSAIOS

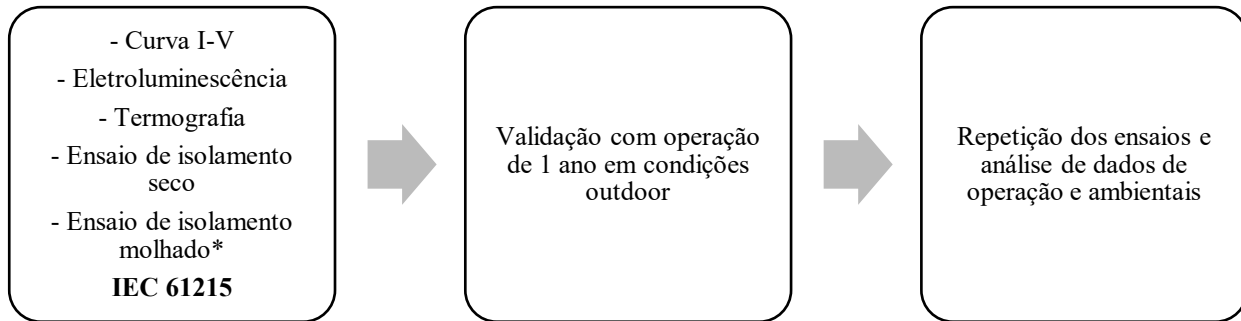
Os módulos sujeitos a reparação de pontos quentes foram sujeitos a vários ensaios de caracterização segundo as normas em vigor (IEC 61215, 2016) (IEC 60891, 2009), entre os quais: medição de curva I-V; eletroluminescência; termografia; ensaios de isolamento seco e molhado. Todos os ensaios foram realizados antes e após a reparação do módulo fotovoltaico e serão novamente realizados após o módulo ser validado com operação de 1 ano em condições *outdoor* ou em caso de falha prematura da reparação.

Foram selecionados 3 modelos de módulos de silício cristalino de diferentes fabricantes e serão utilizados também 3 módulos semelhantes, sem intervenção, como grupo de controlo. A potência média destes módulos é 250W. Cada módulo fotovoltaico está ligado a um microinversor monofásico APS YC250 (APSystems, 2020) de potência nominal de 250W. Está também instalada instrumentação adicional que permite monitorizar parâmetros elétricos DC e AC ao longo de 1 ano de operação para cada módulo em ensaio, com registo de dados com período de 5s.

A instrumentação DC permite obter a medição em tempo real da tensão e corrente de cada módulo fotovoltaico e a instrumentação AC, analisador de rede Circutor CVM-1D (Circutor, 2020), tem monitorização de tensão fase-neutro, corrente, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, energia ativa, reativa e aparente e frequência.

A monitorização dos parâmetros ambientais e radiação solar é garantida por uma estação instalada no mesmo local constituída por um Suntracker SOLYS2 da Kipp & Zonen (Kipp & Zonen, 2020) com dois piranómetros CMP11 para monitorização de radiação solar global e difusa, um pireliómetro CHP1 (radiação solar direta), pluviómetro Pronamic PRO (Pronamic, 2020) e sensor de temperatura do ar e humidade relativa Campbell Scientific EE181 (Campbell Scientific, 2020) com escudo de radiação.

Os módulos em ensaio estão instalados no exterior desde Julho 2020, com orientação a Sul e inclinação de 35° no Pólo de Évora da INIESC – Infraestrutura Nacional de Investigação em Energia Solar de Concentração (INIESC, 2020), nas instalações da Universidade de Évora na Herdade da Mitra (38°31'52.9"N 8°00'42.1"W).



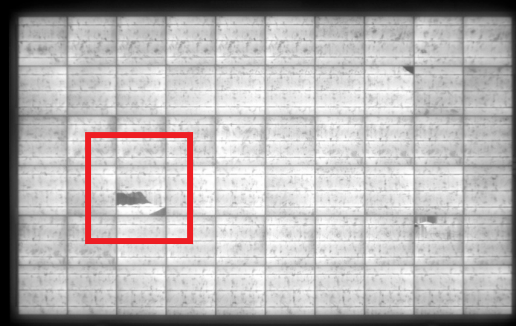
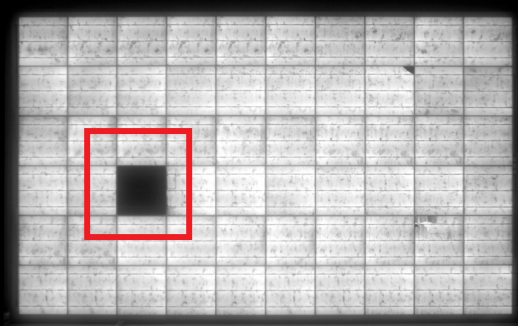
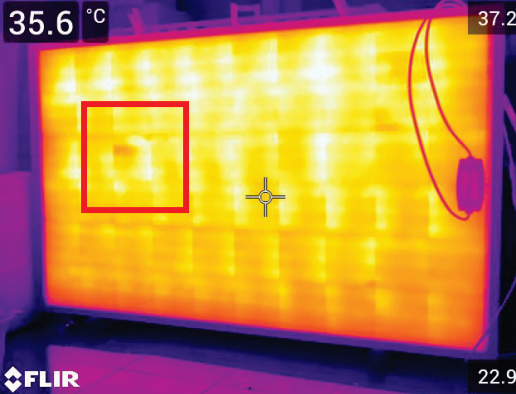
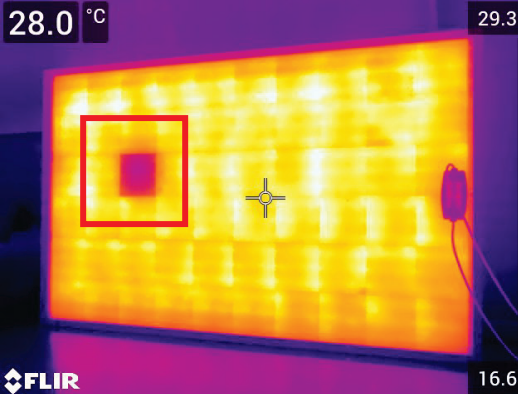
## RESULTADOS

Na Tabela 2 podemos observar os resultados dos ensaios de caracterização realizados a um módulo fotovoltaico antes e após a sua reparação. Na Tabela 22 podemos observar os dados do módulo que foi ensaiado e reparado. O módulo reparado apresentava uma célula rachada à qual foi realizado um *bypass*, de forma a evitar que este ponto quente evoluísse com redução permanente do seu desempenho futuro. Comparando os resultados das curvas I-V da Tabela 23, podemos observar que se reduziu apenas 3.2 W no ponto de máxima potência (MPP) (para valores em STC) após a reparação, isto porque a célula anulada já não tinha uma produção efetiva normal mas representava um ponto quente com potencial evolutivo para degradação do módulo. No caso de uma ou várias células danificadas pode ser possível aumentar o valor do MPP após a reparação. Pelos ensaios de eletroluminescência e termografia *indoor*, podemos observar facilmente que a célula à qual foi feito o *bypass* deixou totalmente de produzir energia, tornando-se área inativa e eliminando com sucesso o ponto quente. Quanto aos ensaios de isolamento seco e molhado, o módulo passou com sucesso, sendo os valores para os dois ensaios superior ao limite mínimo de resistividade para aquele módulo (24.05 MΩ), tanto após como antes da reparação. Assim mantêm-se as condições de segurança do módulo fotovoltaico, eliminando o ponto quente com esta técnica de reparação on-site. Os restantes módulos em ensaio apresentam resultados semelhantes, quer antes do procedimento, quer após. Os resultados dos módulos em ensaio (exemplo da Tabela 23) permitem concluir que as reparações foram concluídas com sucesso. O período de validação em operação real *outdoor* está na sua fase inicial, mas não apresenta até ao momento qualquer incidente ou resultados de operação anormal dos módulos (quer no grupo de controlo, quer nos módulos reparados). A validação prosseguirá pelo período mínimo de 1 ano, o que permitirá avaliar o seu desempenho face à variação sazonal das características ambientais, validando assim a fiabilidade desta técnica de reparação.

Tabela 1. Dados do módulo ensaiado

Dados Fabricante / Módulo	
Número de série	PTOFA0000402510
Fabricante	Mprime
Modelo	M 250P
Pmp [Wp]	250 (0/+5)
Vmp [V]	30,02
Ipm [A]	8,34
Voc [V]	37,6
Isc [A]	8,68

Tabela 2. Resultados dos ensaios realizados a um módulo antes e após a sua reparação

Ensaio	Pré-reparação		Pós-reparação	
Irradiância [W/m <sup>2</sup> ]	1047		1029	
Temperatura [°C]	46,3		37,8	
Rs [Ω]	0,52		0,58	
Uoc [V]	36,91		36,02	
Isc [A]	8,6		8,72	
Umpp [V]	28		27,9	
Impp [A]	8,04		7,97	
FF [%]	71,1		70,8	
Pmpp [W]	225,6		222,4	
Eletroluminescência				
				
Termografia				
Limite	Seco [MΩ]	24,05	> 999	24,05
mínimo	Molhado [MΩ]	-	-	45,9

## CONCLUSÕES

O procedimento de reparação de módulos fotovoltaicos apresenta um grande potencial de minimização de perdas de produção e de custos relacionados com tarefas de O&M. Pela rápida evolução das características dos módulos fotovoltaicos e do mercado, a substituição de módulos com falhas nem sempre é possível ou economicamente viável. No âmbito do projeto GRECO (GRECO, s.d.) desenvolveu-se um procedimento de reparação das falhas que conduzem a pontos quentes. Os resultados dos ensaios de reparação conduzidos permitem concluir que os módulos mantêm as suas características após a reparação no que diz respeito à segurança e performance, estanquicidade e isolamento elétrico, de acordo com a norma em vigor. Os resultados dos ensaios permitem ainda validar o sucesso do procedimento de reparação, eliminando os pontos quentes, e os resultados preliminares de validação outdoor apontam para uma boa fiabilidade face às condições reais de operação.

Pela simplicidade da técnica de reparação, aplicabilidade à maioria de módulos de silício cristalino, possibilidade de execução on-site, este procedimento representa um grande potencial de poupanças significativas para os 25 anos de tempo de vida da capacidade fotovoltaica instalada e futura.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado com financiamento pelo Programa Europeu H2020 de Investigação e Inovação, Fostering a Next Generation of European Photovoltaic SoCiety through Open Science project (GRECO), com a Grant nº787289.

## REFERÊNCIAS

- IEC 60891. (2009). Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.
- APSystems. (09 de 09 de 2020). The APsystems Microinverter. Obtido de <https://usa.apsystems.com/solar-microinverters/>
- Caamaño, E., Lorenzo, E., & Zilles, R. (1999). Quality Control of Wide Collections of PV Modules: Lessons Learned from the IES Experience. *Progress in Photovoltaics*, 137-149 .
- Campbell Scientific. (09 de 09 de 2020). Campbell Scientific offers new EE181 temperature and humidity probe. Obtido de <https://www.campbellsci.com.br/news-ee181-for-sale>
- Circutor. (09 de 09 de 2020). Analisador de rede CVM-1D. Obtido de <http://circutor.es/pt/produutos/medida-e-controllo/analizadores-de-redes-fixos/analizadores-de-redes/serie-cvm-1d-detail>
- GRECO. (s.d.). Fostering a Next Generation of European Photovoltaic Society through Open Science. H2020 Grant Agreement n.787289. Obtido em 08 de 09 de 2020, de [www.greco-project.eu](http://www.greco-project.eu)
- Hoyer, U., Burkert, A., Auer, R., Buerhop-Lutz, C., Vodermayr, C., Mayer, M., & Wotruba, G. (2009). Analysis of PV modules by electroluminescence and IR thermography. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- IEA. (2014). Review of Failures of Photovoltaic Modules - Report IEA-PVPS T13-01:2014. International Energy Agency.
- IEC 61215. (2016). Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval.
- INIESC. (09 de 09 de 2020). Cátedra ER - INIESC. Obtido de <https://www.catedraer.uevora.pt/sobre/iniesc>
- International Renewable Energy Agency, IRENA . (2018). Renewable Power Generation Costs in 2017. Abu Dhabi.
- Jordan\*, D. C., & Kurtz, S. R. (Janeiro de 2013). Progress in Photovoltaics. Photovoltaic Degradation Rates—An Analytical Review, pp. 21:12-29.
- Jordan, D. C., Kurtz, S. R., VanSant, K., & Newmiller, J. (2016). Compendium of photovoltaic degradation rates. *Progress in Photovoltaics*, 24, 978-989.
- Jordan, D. C., Silverman, T. J., Wohlgemuth, J. H., Kurtz, S. R., & Kaitlyn, V. T. (2017). Photovoltaic failure and degradation modes. *Progress in Photovoltaics*. doi:10.1002/pip.2866
- Kipp & Zonen. (09 de 09 de 2020). Solys2 Suntracker. Obtido de <https://www.kippzonen.com/Product/20/SOLYS2-Sun-Tracker#.X1oHYIvOVpY>
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K., Kato, K., . . . Iseghem, M. (2014). Review of Failures of Photovoltaic Modules. IEA-PVPS T13-01:2014.
- Modules, B. S. (s.d.). Obtido em 29 de July de 2020, de <http://www.dibogi.de/hp-fr/bp90.pdf>
- Pronamic. (09 de 09 de 2020). Professional rain and precipitation sensor. Obtido de <https://pronamic.com/products/professional-rain-and-precipitation-sensor>
- Quansah, D., Adaramola, M., & G. Takyi, I. E. (2017). Reliability and Degradation of Solar PV Modules—Case Study of 19-Year-Old Polycrystalline Modules in Ghana. *Technologies*.
- Rayotec. (2020). Solar PV Maintenance & Repair. Obtido em 01 de 08 de 2020, de <https://rayotec.com/Solar-panel-maintenance-service-and-repair/solar-pv-maintenance-repair>
- Reis, A., Coleman, N., Marshall, M., Lehman, P., & Chamberlin., C. (2002). Comparison of PV module performance before and after 11-years of field exposure. Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, New Orleans, Louisiana .

SecondSol. (2020). Photovoltaic Module Repair. Obtido em 01 de 08 de 2020, de <https://www.secondsol.com/en/services/reparaturmodule.htm>

SolarPower Europe . (2020). Global Market Outlook for Solar Power 2020-2024. SolarPower Europe .

SolarPower Europe. (2019). Operation & Maintenance Best Practice Guidelines / Version 4.0. Obtido de [https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/12/SolarPower\\_Europe\\_OM\\_Best\\_Practice\\_Guidelines\\_Version\\_4.0.pdf?cf\\_id=16742](https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/12/SolarPower_Europe_OM_Best_Practice_Guidelines_Version_4.0.pdf?cf_id=16742)

TamizhMani, M. G., Mikonowicz, A., & Kuitche, J. (2011). Nameplate, datasheet and sampling requirements for PV modules. Solar America Board for Codes and Standards.

Ulrike, J., Herz, M., Köntges, M., Parlevliet, D., Paggi, M., Tsanakas, I., . . . Tanahashi, T. (2018). Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications. EA-PVPS T13-10:2018.

Woodhouse, M., Walker, A., Fu, R., Jordan, D., & Kurtz, S. (2019). The role of reliability and durability in photovoltaic system economics. NREL.