

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Avaliação de desempenho de produção de centrais fotovoltaicas

Inês Maria Faria Tereso

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Cláudio Monteiro

28 de Junho de 2021

Resumo

A energia solar fotovoltaica tem vindo a registar um aumento global na sua capacidade instalada. Deste modo, as empresas que possuem parques FV estão cada vez mais interessadas em monitorizar o desempenho de forma contínua das suas produções. Os sistemas de monitorização são, então, capazes de avaliar o desempenho da produção e também de emitir sinais de alerta quando os valores registados estão fora da gama típica de funcionamento.

Assim, o principal objetivo desta dissertação passa por desenvolver uma ferramenta para o cálculo de indicadores de desempenho de centrais fotovoltaicas. Pretende-se que a ferramenta seja capaz de detetar situações de falha, consoante um limite imposto pelo utilizador/operador da central. Desta forma, conseguem-se filtrar as situações mais significativas e onde existe um certo grau de certeza que ocorreu uma falha.

A metodologia implementada consiste na avaliação e desenvolvimento de um conjunto de indicadores, que são baseados em medições relativamente a um valor de referência. Quanto à escolha do valor de referência, foram consideradas referências de valores reais medidos em vez de referências baseadas em simulações. Assim, os valores de referência considerados podem resultar de medições de produções do próprio equipamento ou então de medições de produções de equipamentos semelhantes.

A estrutura da metodologia é aplicada numa cascata de equipamentos, começa ao nível dos inversores, passa para os quadros de junção e termina nas *strings*. Nos inversores, ocorrem tipicamente as avarias de grande magnitude, onde se englobam as avarias dos próprios inversores ou avarias em equipamentos a jusante destes. Já ao nível das *strings*, incluem-se as avarias das próprias como um todo ou então em alguns dos módulos, sendo habitualmente avarias de menor magnitude. Relativamente ao nível dos quadros de junção, apenas foram comparadas produções dos diferentes quadros com o intuito de verificar se existiam discrepâncias nas produções.

Considerou-se como metodologia de análise duas janelas temporais: sendo uma janela semanal para detetar as falhas persistentes e uma janela diária para as falhas temporárias. A metodologia baseia-se, também, numa análise de quantis do desvio do desempenho de cada equipamento, ou seja, resulta de uma análise estatística.

De forma a validar e testar a metodologia, aplicou-se este método a uma central FV na região sul de Portugal. Os resultados obtidos demonstraram que existiram alguns períodos de falhas que demoraram a ser resolvidas, especialmente falhas ao nível das *strings*.

Concluindo, foram então criadas dezenas de indicadores que, se avaliados em simultâneo, permitem uma monitorização bastante detalhada do desempenho da central. Torna-se assim possível corrigir atempadamente as situações de falhas, resultando num benefício para a exploração da central.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica; Indicadores de Desempenho; Controlo de Qualidade; Monitorização Contínua; Deteção de Falhas.

Abstract

Photovoltaic solar energy has been experiencing an overall increase in its installed capacity. In this way, companies that own PV plants are increasingly interested in continuously monitoring the performance of their productions. Monitoring systems are then able to assess production performance and to emit warning signals when recorded values are outside the typical operating range.

Thus, the main objective of this dissertation is to develop a tool for the calculation of performance indicators of photovoltaic plants. The tool is intended to be able to detect failure situations, depending on a limit imposed by the plant operator. This way, the most significant situations can be filtered out and where there is a certain degree of certainty that a failure has occurred.

The methodology implemented consists in the evaluation and development of a set of indicators, which are based on measurements in relation to a reference value. Regarding the choice of reference value, references of measured real values were considered instead of simulation-based references. Thereby, the reference values considered may result from measurements of productions of the equipment itself or from measurements of similar equipment productions.

The structure of the methodology is applied in a cascade of equipment, starts at the level of the inverters, passes to the junction boxes and ends in the strings. In inverters, failures of great magnitude typically occur, which includes the failures of the inverters themselves or failures in equipment downstream of these. At the level of strings, are included the breakdowns of the ones themselves as a whole or in some of the modules, being usually breakdowns of lesser magnitude. Regarding the level of the junction boxes, only productions of the different boxes were compared to verify whether there were discrepancies in the productions.

Two-time windows were considered as the methodology of analysis: a weekly window to detect persistent failures and a daily window for temporary failures. The methodology is also based on an analysis of quantiles of the deviation of performance of each equipment, that is, it results from a statistical analysis.

To validate and test the methodology, this method was applied to a PV plant/central in the southern region of Portugal. The results showed that there were some periods of failures that took time to be resolved, especially failures at the string level.

In conclusion, dozens of indicators were created, which, if evaluated simultaneously, allows a very detailed monitoring of the performance of the plant. So, it becomes possible to correct the failures in a timely manner, resulting in a benefit for the operation of the plant.

Agradecimentos

Após terminar mais uma etapa na vida académica, gostaria de agradecer a todos que, de maneiras diferentes, me ajudaram e fizeram com que tudo isto fosse possível.

Para começar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Cláudio Monteiro pela sua enorme disponibilidade e por toda a motivação que foi transmitindo ao longo deste projeto. Terei sempre em conta os seus conselhos para a vida profissional que se avizinha.

Agradeço também à Finerge pela disponibilidade e informação cedida, em especial aos Engenheiros Hugo Carvalho e Nelson Ferraz, que sempre se mostraram disponíveis para esclarecer quaisquer dúvidas.

Agradeço à minha família por todo o apoio, em especial aos meus pais que sempre fizeram de tudo para que o meu percurso académico fosse o melhor e sempre me transmitiram a importância do trabalho e do esforço na vida. Às minhas irmãs que sempre serão o meu maior exemplo para tudo, Ilda e Margarida, um obrigada não chega para todo o apoio que vocês me deram. E ao meu avô Ulisses, que não está cá para festejar, mas que tenho a certeza que estará contente por ver a última neta a terminar o curso, um obrigada muito especial por todos os ensinamentos que me passaste.

Ao meu melhor amigo, o que não me deixa desistir de nada e o que faz de mim uma pessoa melhor e muito mais feliz, um obrigada do tamanho do mundo, Saldanha. O teu apoio foi, e sempre será, muito importante para mim.

Às minhas Marias, obrigada por serem as minhas companheiras de todas as horas e por me mostrarem que numa amizade verdadeira nada se cobra. Serão para sempre uma parte muito importante de mim.

Aos meus amigos, aqueles 16 de todas as horas, especialmente das horas noturnas, uma palavra de apreço. Convosco aprendi que existe tempo para tudo e se não existir, está tudo bem, dá sempre desenrascar. Obrigada por fazerem destes 5 anos, os mais memoráveis da minha vida.

Para terminar, mas não menos importante, um obrigada à minha Rita e Luísa, por serem um exemplo de verdadeira amizade. Não importa o tempo que passe, bastará sempre uma chamada para ir tomar café e pôr a conversa em dia.

Inês Tereso

*“Aqueles que passam por nós não vão sós, não nos deixam sós.
Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.”*

Antoine de Saint-Exupéry

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Questões de Investigação	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Estrutura da Dissertação	3
1.5	Desenvolvimento do Trabalho em Ambiente Empresarial	4
2	Estado da Arte	5
2.1	Centrais Fotovoltaicas	5
2.1.1	Qualidade e Características dos Módulos Fotovoltaicos	5
2.1.2	Qualidade e Características dos Inversores	8
2.1.3	Qualidade e Características das Estruturas de Suporte e Seguimento	10
2.1.4	Otimização da Disposição dos Equipamentos	11
2.1.5	Qualidade da Instalação Elétrica e Interligação	13
2.1.6	Variabilidade do Recurso Solar	14
2.2	Avaliação de Desempenho de Produção	15
2.2.1	Tipos de Avaliação de Desempenho	15
2.2.2	Indicadores de Desempenho	17
2.3	Deteção de Falhas	20
2.3.1	Tipos de Falhas	20
2.3.2	Causas de Degradação de Desempenho	25
2.3.3	Deteção Visual de Falhas	26
2.3.4	Deteção Automática de Falhas	29
3	Caracterização da Central e Análise de Dados	37
3.1	Caracterização da Central	37
3.2	Análise de Dados	39
3.3	Organização dos Dados	45
4	Metodologia	47
4.1	Aspetos Gerais	47
4.2	Descrição da Ferramenta	48
4.2.1	Passo 1- Leitura das Produções	50
4.2.2	Passo 2- Cálculo do Valor Médio das Produções	50
4.2.3	Passo 3- Cálculo dos Desvios de Produção	50
4.2.4	Passo 4- Cálculo dos Indicadores Diários e Semanais	50
4.2.5	Passo 5- Cálculo dos Quantis de Cada Indicador	52
4.2.6	Passo 6- Critério de Paragem	53

4.3	Exemplo da Aplicação da Metodologia	53
5	Resultados	57
5.1	Aspetos Gerais	57
5.2	Análise de Desempenho dos Inversores	58
5.2.1	Caracterização da Produção	58
5.2.2	Análise dos Indicadores de Desempenho	59
5.3	Análise de Desempenho de <i>Strings</i>	72
5.3.1	Caracterização da Produção	72
5.3.2	Análise dos Indicadores de Desempenho	74
5.4	Discussão dos Resultados	87
6	Conclusões	89
6.1	Conclusões	89
6.2	Respostas às Questões de Investigação	91
6.3	Futura Utilização do Trabalho Realizado	93
A	Indicadores de Desempenho dos Inversores	95
A.1	Janela Diária	95
A.2	Janela Semanal	98
B	Indicadores de Desempenho das <i>Strings</i>	101
B.1	Janela Diária	101
B.2	Janela Semanal	105
C	Casos de Falhas nas <i>Strings</i>	109
C.1	<i>Strings</i> do Quadro de Junção 4.1.2	109
	Referências	111

Lista de Figuras

2.1	Diagrama do circuito do inversor <i>Huawei SUN2000</i>	9
2.2	Arquitetura básica do sistema de monitorização	10
2.3	Distância entre filas de módulos	11
2.4	Abordagens de manutenção preditiva	16
2.5	Classificação das falhas de um sistema FV	20
2.6	Defeitos assimétricos num sistema FV	21
2.7	Curvas I-V antes e após falha entre strings	22
2.8	Curvas I-V antes e após falha à terra	22
2.9	Díodo de <i>bypass</i> de circuito aberto e em curto-circuito	23
2.10	Descoloração num módulo FV	26
2.11	Delaminação num módulo FV	27
2.12	Situações de corrosão em (a) no extremo e em (b) no centro da célula	27
2.13	Vidro de um módulo FV com quebras e fissuras	28
2.14	Ponto quente detetado num módulo FV	28
2.15	Histograma do PR anual e respetiva curva de distribuição normal, entre 2013 e 2017	30
2.16	Comparação entre curvas I-V após quebra de um módulo FV	30
2.17	Módulo FV após inspeção visual (à esquerda) e imagem EL (à direita)	32
2.18	Ponto quente detetado através de imagem térmica	32
2.19	Inspeção com ultrassons	33
2.20	Exemplos de imagens utilizadas como dados de entrada para DNN	35
2.21	Exemplos de gráficos utilizados como dados de entrada para DNN	35
3.1	Imagem satélite da central fotovoltaica em estudo	37
3.2	Componentes da central: módulo (à esquerda) e inversor (à direita)	38
3.3	Esquema unifilar do inversor em estudo	39
3.4	Parte do esquema unifilar da central	39
3.5	Evolução da potência CA nas duas unidades do inversor 1	40
3.6	Comparação da potência CA nos inversores 3 e 4	40
3.7	Comportamento das unidades inversoras do inversor 3	41
3.8	Evolução da potência CA no inversor 1	41
3.9	Evolução das variáveis meteorológicas medidas	42
3.10	Evolução da potência CA num dia de nuvens contínuas	42
3.11	Evolução da potência CA num dia de nuvens intermitentes	43
3.12	Comparação da potência CA nos 4 inversores	43
3.13	Comparação da potência CA nos 4 inversores durante dois dias	44
3.14	Comparação da energia produzida pelas diferentes <i>strings</i> de um quadro de junção	44
3.15	Esquema ilustrativo do tratamento hierárquico	45

4.1	Fluxograma para o cálculo dos indicadores de desempenho	49
4.2	Organização dos diferentes indicadores de desempenho	51
4.3	Indicadores de desempenho para os diferentes momentos do dia	52
4.4	Distribuição normal para a identificação do quantil	52
4.5	Representação dos desvios de produção no mês de Julho	53
4.6	Indicadores de desempenho para o inversor 1	54
4.7	Indicador de desempenho Q1_d para o inversor 1 e 2 no mês de Julho	54
4.8	Indicador de desempenho Q1_s para o inversor 1 e 2 no mês de Julho	55
4.9	Indicador de desempenho Q1_d_glob para o inversor 1 e 2 no mês de Julho	55
4.10	Indicador de desempenho Q1_d_ind para o inversor 1 e 2 no mês de Julho	56
5.1	Caracterização energética dos quatro inversores durante o ano de 2019	58
5.2	Análise mensal das médias do indicador Q1_d para os quatro inversores	60
5.3	Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q1_d para os quatro inversores	60
5.4	Análise mensal das médias do indicador Q2_d para os quatro inversores	61
5.5	Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q2_d para os quatro inversores	61
5.6	Análise mensal das médias do indicador Q3_d para os quatro inversores	61
5.7	Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q3_d para os quatro inversores	62
5.8	Análise mensal das médias do indicador Q4_d para os quatro inversores	62
5.9	Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q4_d para os quatro inversores	62
5.10	Análise global dos desvios-padrões dos indicadores Q1_d, Q2_d, Q3_d e Q4_d	63
5.11	Produção dos quatro inversores na 1ª semana de Fevereiro	64
5.12	Produção dos quadros de junção do inversor na 1ª semana de Fevereiro	67
5.13	Recorte do esquema unifilar da central em estudo	67
5.14	Produção dos quatro inversores numa semana de Julho	68
5.15	Caracterização energética das <i>strings</i> do Q 4.1.2 nos primeiros 6 meses de 2019	72
5.16	Caracterização energética das <i>strings</i> do Q 4.1.2 nos últimos 6 meses de 2019	73
5.17	Caracterização energética das <i>strings</i> do Q 1.2.7 nos primeiros 6 meses de 2019	73
5.18	Caracterização energética das <i>strings</i> do Q 1.2.7 nos últimos 6 meses de 2019	74
5.19	Referências de Q1_d para as <i>strings</i> do Q 4.1.2	75
5.20	Referências de Q2_d para as <i>strings</i> do Q 4.1.2	75
5.21	Referências de Q3_d para as <i>strings</i> do Q 4.1.2	76
5.22	Referências de Q4_d para as <i>strings</i> do Q 4.1.2	76
5.23	Referências de Q1_d para as <i>strings</i> do Q 1.2.7	77
5.24	Referências de Q2_d para as <i>strings</i> do Q 1.2.7	77
5.25	Referências de Q3_d para as <i>strings</i> do Q 1.2.7	77
5.26	Referências de Q4_d para as <i>strings</i> do Q 1.2.7	78
5.27	Produção das <i>strings</i> do Q 4.1.2 no início de Outubro	79
5.28	Produção das <i>strings</i> do Q 4.1.2 a meio de Outubro	79
5.29	Produção das <i>strings</i> do Q 1.2.7 entre 12 e 14 de Maio	82
5.30	Produção das <i>strings</i> do Q 1.2.7 entre 22 e 24 de Maio	83
5.31	Produção das <i>strings</i> 6,7 e 12 no dia 14/11/2019	87

Lista de Tabelas

2.1	Testes realizados pela PVEL para qualificação dos módulos	6
2.2	Tipos de tecnologias para as células fotovoltaicas	7
2.3	Tipos de inversores	8
2.4	Análise dos otimizadores de potência	13
2.5	Desafios técnicos da integração FV	14
2.6	Revisão bibliográfica dos métodos de caracterização elétrica	31
2.7	Revisão bibliográfica dos métodos de ML	34
5.1	Atribuição dos limites horários para cada mês de 2019	58
5.2	Comparação da produção mensal dos quatro inversores	59
5.3	Análise dos indicadores diários globais do inversor 1	64
5.4	Análise dos indicadores diários individuais do inversor 1	65
5.5	Análise dos indicadores semanais globais do inversor 1	66
5.6	Análise dos indicadores semanais individuais do inversor 1	66
5.7	Análise dos indicadores diários globais do inversor 4	69
5.8	Análise dos indicadores diários individuais do inversor 4	70
5.9	Análise dos indicadores semanais globais do inversor 4	71
5.10	Análise dos indicadores semanais individuais do inversor 4	72
5.11	Análise dos indicadores globais diários da <i>string</i> 11	80
5.12	Análise dos indicadores globais semanais da <i>string</i> 11	81
5.13	Análise dos indicadores globais diários das <i>strings</i> 6 e 7	83
5.14	Análise dos indicadores individuais diários das <i>strings</i> 6 e 7	84
5.15	Análise dos indicadores globais semanais das <i>strings</i> 6 e 7	85
5.16	Análise dos indicadores individuais semanais das <i>strings</i> 6 e 7	85
5.17	Médias mensais dos indicadores semanais das <i>strings</i> 6 e 7	86
5.18	Análise dos indicadores semanais das <i>strings</i> 6 e 7 no dia 14/11/2019	86
5.19	Caracterização das falhas através da avaliação dos indicadores de desempenho	88
A.1	Análise mensal do indicador Q1_d para os quatro inversores	95
A.2	Análise mensal do indicador Q2_d para os quatro inversores	96
A.3	Análise mensal do indicador Q3_d para os quatro inversores	96
A.4	Análise mensal do indicador Q4_d para os quatro inversores	97
A.5	Análise global dos desvios-padrões dos indicadores Q1_d, Q2_d, Q3_d e Q4_d	97
A.6	Análise mensal do indicador Q1_s para os quatro inversores	98
A.7	Análise mensal do indicador Q2_s para os quatro inversores	99
A.8	Análise mensal do indicador Q3_s para os quatro inversores	99
A.9	Análise mensal do indicador Q4_s para os quatro inversores	100
A.10	Análise global dos desvios-padrões dos indicadores Q1_s, Q2_s, Q3_s e Q4_s	100

B.1	Referências anuais para os indicadores diários do quadro 4.1.2	102
B.2	Referências anuais para os indicadores diários do quadro 1.2.7	103
B.3	Análise global dos desvios-padrões globais diários do Q 4.1.2	104
B.4	Análise global dos desvios-padrões globais diários do Q 1.2.7	104
B.5	Referências anuais para os indicadores semanais do quadro 4.1.2	105
B.6	Referências anuais para os indicadores semanais do quadro 1.2.7	106
B.7	Análise global dos desvios-padrões globais semanais do Q 4.1.2	107
B.8	Análise global dos desvios-padrões globais semanais do Q 1.2.7	107
C.1	Análise dos indicadores individuais diários da <i>string</i> 11	109

Abreviaturas e Símbolos

GW	Gigawatt
MW	Megawatt
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
TWh	Terawatt-hora
FV	Fotovoltaico
PNEC	Plano Nacional Energia e Clima
PAC	Certificado de Aceitação Provisória
FAC	Certificado de Aceitação Final
O&M	Operação e Manutenção
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
PID	<i>Potential-induced Degradation</i>
mono-Si	Monocristalina
poli-Si	Policristalina
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Seleneto de Cobre, Índio e Gálio
a-Si	Silício Amorfo
PERC	Emissor Passivo e Contacto Traseiro
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
PR	<i>Performance Ratio</i>
EL	Eletroluminescência
IV	Infravermelhos
ML	<i>Machine Learning</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
SNN	<i>Shallow Neural Network</i>
DNN	<i>Deep Neural Network</i>
TL	<i>Transformerless</i>
MS	<i>Master-Slave</i>
VA	Valor de Alerta

Capítulo 1

Introdução

Neste primeiro capítulo, apresenta-se e contextualiza-se o tema da dissertação, indica-se também a motivação para o seu desenvolvimento e os objetivos propostos. É especificada a estrutura da dissertação, bem como a abordagem ao trabalho em ambiente empresarial.

1.1 Contextualização e Motivação

Na última década, a energia solar fotovoltaica registou um crescimento acentuado na sua capacidade instalada. Em 2019, estima-se que cerca de 116,9 GW tenham sido instalados globalmente, registando um aumento de 13% face ao ano anterior. Esse aumento levou a um total de 630 GW de capacidade solar fotovoltaica instalada mundialmente [1]. A Europa possui aproximadamente 24% dessa capacidade solar fotovoltaica, sendo o segundo maior mercado solar do mundo.

Para 2030, perspetiva-se, a nível mundial, uma energia FV de 5000 TWh/ano, valor esse cinco vezes superior ao registado no ano de 2020. Já a nível europeu, prevê-se cerca de 300 TWh/ano, o que corresponde ao dobro do registado em 2020.

Portugal também tem vindo a apostar cada vez mais nas energias renováveis, estabelecendo objetivos ambiciosos nessa área. É importante referir o Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030), aprovado a 21 de Maio de 2020, em Conselho de Ministros, que vem definir as principais linhas de atuação, medidas a tomar e objetivos a cumprir. A aposta para o ano de 2030 para o setor eletroprodutor passa essencialmente pela energia solar fotovoltaica, com uma meta de 9 GW de capacidade instalada. [2]

No contexto da evolução que se vive, existe o interesse de desenvolvimento por parte das empresas de solar fotovoltaico. As empresas terão cada vez mais parques FV nos seus portfólios, necessitando assim de operar esses parques e realizar as suas manutenções. Por exemplo, atualmente a Finerge opera 53 centrais eólicas e 16 parques solares, o que equivale a 11,99 TWh de produção eólica e 1,27 TWh de produção solar. A tendência para o futuro, em conformidade com o PNEC 2030, é de uma maior aposta na energia solar FV.

Devido ao crescimento acentuado da indústria fotovoltaica, o controlo de qualidade tornou-se indispensável a qualquer projeto fotovoltaico de grande escala. Este controlo tem como objetivo

minimizar os períodos de indisponibilidade e maximizar o desempenho da central FV. Existem então diferentes momentos para avaliar o desempenho de uma central:

- Avaliação do desempenho no momento de entrega provisória do parque (PAC), corresponde a um período curto após a entrada em funcionamento;
- Avaliação do desempenho anual do parque no momento de entrega e finalização da garantia de instalação (FAC), corresponde a um período mais longo, tipicamente de dois anos;
- Avaliação contínua do desempenho do parque, para efeitos de monitorização e gestão da Operação e Manutenção (O&M) que, por sua vez, pode ser uma manutenção preventiva, corretiva ou preditiva. É este o foco da dissertação, dado que existe ainda um grande potencial nesta área para desenvolver sistemas mais avançados.

As metodologias de avaliação de desempenho referidas anteriormente utilizam diferentes tipos de informação, podem ser registos históricos, monitorização online ou até mesmo informação preditiva. Este último tipo de informação usa um conjunto de dados para prever cenários ou tendências futuras, tendo por isso bastante interesse para as empresas.

Com o avanço da tecnologia, o detalhe da informação monitorizada e a inteligência das ferramentas de análise que estão a ser desenvolvidas, torna-se possível detetar falhas a um nível do sistema cada vez mais detalhado e preciso.

Relativamente ao processo de avaliação de desempenho, é necessário definir indicadores que devem ser devidamente formulados e caracterizados quanto à sua informação de entrada na formulação. Torna-se importante estabelecer os parâmetros mencionados anteriormente, para que depois se possa comparar o desempenho do mesmo sistema em diferentes momentos de operação ou ainda entre sistemas com diferentes características.

Pelas razões mencionadas anteriormente, considera-se então importante, para otimizar os proventos resultantes do portfólio de uma empresa, ter ferramentas e indicadores adequados para a medição e acompanhamento do desempenho dos parques solares fotovoltaicos.

1.2 Questões de Investigação

A presente dissertação propõe-se a responder às seguintes questões de investigação ao longo do seu desenvolvimento:

- Que tipo de metodologias, detalhe de informação e indicadores são usados e quais são os mais apropriados para a avaliação de desempenho, nos diversos momentos da avaliação?
- Quais os benefícios energéticos e económicos que podem ser conseguidos com a análise de desempenho?
- Que nível de automatização se pode conseguir com as análises de desempenho automatizadas?

- Qual a dificuldade técnica e custos de implementação de sistemas automatizados de análise de desempenho?

Para responder às questões de investigação colocadas anteriormente, apresentam-se as possíveis abordagens para chegar a soluções:

- Formalizar indicadores de desempenho;
- Desenvolver algoritmos de análise de desempenho;
- Desenhar ferramentas de análise de desempenho.

1.3 Objetivos

A dissertação tem como principal objetivo a avaliação de desempenho de produção de centrais fotovoltaicas. Pretende-se com isso criar metodologias de aprendizagem automática para o cálculo de indicadores de desempenho.

De seguida apresentam-se os objetivos específicos desta dissertação:

- Estudar indicadores de desempenho usados nos diferentes momentos de avaliação da produção de uma central;
- Criar modelos de simulação de produção de forma a estimar os valores de referência;
- Desenvolver uma ferramenta de análise de informação capaz de avaliar desvios de desempenho;
- Desenvolver um processo para detetar anomalias no modo operacional;
- Testar e validar os modelos desenvolvidos.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

No presente capítulo, apresenta-se e contextualiza-se o tema da dissertação, indica-se também a motivação para o seu desenvolvimento e os objetivos propostos. É ainda especificada a estrutura da dissertação, bem como a abordagem ao trabalho em ambiente empresarial.

No Capítulo 2, é descrito o estado da arte e são apresentados trabalhos considerados relevantes para o presente tema de dissertação. É abordado o estado atual das tecnologias fotovoltaicas, bem como a avaliação de desempenho de produção e, por último, apresentam-se os modos de deteção de falhas.

No Capítulo 3, é feita a caracterização da central em estudo e realiza-se uma análise aos dados fornecidos, com o intuito de detetar medições anómalas e ainda de caracterizar os diversos padrões temporais.

No Capítulo 4, é apresentada a metodologia implementada no cálculo de indicadores de desempenho. Com recurso a fluxogramas e esquemas serão explicados os algoritmos desenvolvidos, mencionando ainda os seus pressupostos e objetivos.

No Capítulo 5, tem-se como objetivo testar e validar a metodologia desenvolvida, aplicando-a ao caso de estudo desta dissertação: a Central Fotovoltaica de Morgado de Apra, no concelho de Loulé. Assim, com o intuito de avaliar o desempenho dos componentes desta central FV, irá proceder-se ao cálculo dos diversos indicadores, os quais serão apresentados e discutidos ao longo do capítulo.

Por último, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais acerca do trabalho desenvolvido e ainda algumas indicações para futuras aplicações da ferramenta.

1.5 Desenvolvimento do Trabalho em Ambiente Empresarial

A presente dissertação resulta de uma parceria entre a Finerge e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

A Finerge é uma empresa produtora de energia renovável, aposta na área da energia eólica e da energia solar. A empresa foi fundada em 1996 e tem investido, em Portugal e Espanha, no desenvolvimento, construção e aquisição de centrais eólicas e solares. [3]

Ao longo do desenvolvimento do trabalho existiram reuniões com os Engenheiros Hugo Carvalho e Nelson Ferraz, para o envio de dados da central FV e, ainda, para discussão de metodologias.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo, apresenta-se o estado da arte dos conteúdos considerados relevantes para o tema da dissertação. Inicialmente, será apresentado o estado atual da tecnologia fotovoltaica e da avaliação do desempenho de produção. Por último, expõe-se a diversidade dos estudos relacionados com a deteção de falhas.

2.1 Centrais Fotovoltaicas

As medidas de garantia de qualidade de uma central fotovoltaica estão-se a tornar cada vez mais relevantes. Neste sentido, é necessário avaliar o desempenho das instalações, o qual depende:

- Da qualidade dos equipamentos;
- Da disposição dos equipamentos;
- Da fiabilidade da instalação e interligação;
- Do recurso solar e da sua variabilidade.

2.1.1 Qualidade e Características dos Módulos Fotovoltaicos

Dada a grande variedade de módulos que existe no mercado, é necessário ter em conta alguns parâmetros para avaliar a sua qualidade. Começando pelo fabricante, deve-se ter em conta a classificação *Tier 1*, publicada, por exemplo, pela *BloombergNEF* [4] e que indica os maiores fabricantes de módulos fotovoltaicos a nível mundial. A classificação é feita consoante a capacidade e estabilidade financeira dos fabricantes de módulos FV [5].

É também importante escolher módulos que sejam certificados. Relativamente à certificação de segurança, deve-se ter em conta a norma IEC 61730. No que diz respeito ao *design*, caso seja um módulo de silício cristalino deve-se considerar a norma IEC 61215, já para o caso dos módulos amorfos considera-se a norma IEC 61646. Os módulos certificados pelas normas mencionadas são considerados módulos de elevada fiabilidade e durabilidade. [6]

A qualidade de um módulo solar depende do período de validade da garantia, deve-se dar preferência a garantias mais longas. Atualmente, para fabricantes de módulos solares Tier 1, a garantia de desempenho é de cerca de 25 anos, já a garantia de mão de obra é mais curta, sendo tipicamente de 10 anos [7].

Relativamente ao coeficiente de degradação, é aconselhável escolher módulos com baixas taxas de degradação. Este valor é normalmente indicado na folha de características e representa a descida de produção que os módulos sofrem ao longo do tempo. A taxa de degradação centra-se na faixa 0,5%-0,8%/ano [8].

Em relação à fiabilidade de um módulo fotovoltaico, deve-se ter em consideração estudos realizados por laboratórios que fazem monitorização de fiabilidade dos mesmos, como por exemplo, o relatório "*2020 PV Module Reliability Scorecard*" [9], publicado pela PVEL em parceria com a DNV GL. Este laboratório realiza uma série de testes rigorosos para avaliar o desempenho dos módulos. O contexto e procedimento desses testes encontra-se descrito na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Testes realizados pela PVEL para qualificação dos módulos. Adaptado de [9]

Testes	Contexto	Procedimento
Ciclo térmico	Módulos sofrem expansões e contrações devido a variações da temperatura ambiente. Os componentes de um módulo têm diferentes coeficientes de expansão térmica	Módulos são sujeitos a oscilações extremas de temperatura, entre -40°C e 85°C, num total de 84 dias
Calor Húmido	Altas temperaturas e humidade podem provocar falhas prematuras dos módulos e a sua degradação	Módulos são submetidos a uma temperatura de 85°C e a uma humidade relativa de 85%, cerca de 84 dias
Sequência de Carga Mecânica Dinâmica	Quando os módulos são sujeitos a cargas mecânicas (neve pesada) ou forças (ventos fortes), os componentes sofrem stress e podem quebrar	Módulo é sujeito a 1000 ciclos de carga alternada a 1000 Pa. Após isso sofre 50 ciclos térmicos seguidos de três conjuntos de 10 ciclos de congelamento de humidade (85°C a 85% humidade relativa, seguido de uma diminuição rápida até -40°C)
Degradação Potencialmente Induzida (PID)	Tensões elétricas elevadas no sistema podem provocar falhas nos circuitos elétricos das células FV. Pode ser preocupante em situações de inversores sem transformadores ligados à terra	Módulo é colocado numa câmara ambiental, a polarização da tensão igual à classificação de tensão máxima do sistema do módulo e coloca-se a 85°C com uma humidade relativa de 85%, durante dois ciclos de 96h

A eficiência de um módulo está relacionada com o rácio entre a potência de saída e a potência de entrada, compete à célula fotovoltaica a conversão direta da energia da irradiação em eletricidade. As células são classificadas em três gerações:

- 1ª geração engloba as células de silício cristalino, podendo ser tecnologia monocristalina (mono-Si) ou policristalina (poli-Si);
- 2ª geração compreende as tecnologias de película fina, como é o caso do Telureto de Cádmio (CdTe), do Seleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS) e do Silício Amorfo (a-Si);
- 3ª geração inclui as tecnologias emergentes, por exemplo, as células multijunção, as células orgânicas e as células Perovskita.

Tabela 2.2: Tipos de tecnologias para as células fotovoltaicas. Adaptado de [10]

Tecnologia	Eficiência máxima da célula	Quota no mercado
Mono-Si	26,7%	66%
Poli-Si	23,2%	29%
CdTe	21,0%	4,2%
CIGS	23,4%	1,2%
a-Si	10%	0,1%
Células multijunção	47,1%	-
Células orgânicas	13,5%	-
Célula Perovskita	21,6%	-

Segundo [11], a indústria fotovoltaica do silício tem-se esforçado continuamente na melhoria da eficiência e no aumento de potência dos módulos. Dado o ambiente competitivo em que os fabricantes se encontram, o desafio passa por descobrir os melhores caminhos tecnológicos a seguir. De forma geral, o plano para o contínuo desenvolvimento das células FV de silício pode passar por:

- Aplicar a tecnologia Emissor Passivo e Contacto Traseiro (*PERC*): a qual é concebida através da adição de uma camada dielétrica passiva entre a camada inferior de alumínio e a camada base de silício. Consequentemente, reduzem-se as recombinações dos eletrões, aumentando assim a eficiência da célula [12];
- Desenvolver células de barramentos múltiplos (*multi-busbar*): através da adição de mais barramentos na célula FV, é possível reduzir as perdas resistivas e, deste modo, obter eficiências mais elevadas [13]. As células convencionais tinham cerca de 2 barramentos, sendo que atualmente procuram-se células com, pelo menos, 5 barramentos [14];
- Implementar tecnologia de meia célula (*half-cell*): consiste no processo de cortar as células ao meio, ou seja, no mesmo módulo passa-se a ter o dobro das células, isto provoca uma diminuição da resistência, o que significa que mais energia será absorvida e produzida [15]. Os módulos com meia célula possuem tensões mecânicas inferiores e ainda uma menor probabilidade de microfissuras [15];

- Implementar uma configuração bifacial: passa por equipar o módulo com células fotovoltaicas na sua parte superior e parte posterior. As células superiores funcionam como as convencionais, já as inferiores absorvem a luz refletida no solo [16]. Um estudo da *LONGi Solar* mostra que a tecnologia bifacial pode aumentar a eficiência em 11% relativamente a um módulo convencional [17];
- Desenvolver células multijunção: foram obtidas eficiências até 47,1% com células multijunções III-V sob concentração (Tabela 2.2). Contudo, a atual implementação do FV passa pela tecnologia de silício (maior quota de mercado), deste modo, tem-se apostado em células multijunção com silício e semicondutores III-V, tendo-se atingido eficiências de 32,8% para duas junções e de 34,1% para três junções [11].

2.1.2 Qualidade e Características dos Inversores

O inversor é o dispositivo eletrónico responsável por converter a corrente contínua em corrente alternada, por controlar a produção, de modo a extrair a potência máxima dos módulos e é, ainda, responsável por monitorizar todas as variáveis de produção do sistema. Pode-se considerar que a inteligência do sistema fotovoltaico está no inversor e, como tal, este equipamento afeta o seu desempenho global [18].

A escolha do inversor tem que ter em consideração alguns parâmetros. Começando pelo fabricante, deve-se dar preferência a fabricantes que sejam uma referência no mercado mundial. Por exemplo, pode-se consultar a lista publicada anualmente pela *Solar Review*, onde é revelado o seu *top* de inversores a nível mundial [19].

Deve-se também dar preferência a inversores que possuam as seguintes certificações: norma IEC 62109, refere-se a questões de segurança para conversores de energia fotovoltaica a nível internacional, já a norma IEC 62093 qualifica o equipamento em termos de *design* [20].

Quanto à escolha do tipo de inversor a utilizar, esta varia consoante certas características do projeto fotovoltaico. São três os modelos existentes de inversores para sistemas fotovoltaicos ligados à rede, as suas principais características apresentam-se na tabela abaixo.

Tabela 2.3: Tipos de inversores. Adaptado de [10]

Tipo inversor	Potência	Eficiência máxima	Quota no mercado
Inversor de <i>string</i>	Até 150 kWp	98%	61,6%
Inversor central	Acima de 80 kWp	98,5%	36,7%
Microinversor	Gama de potência do módulo	90%-97%	1,7%

Os inversores de *string* são os mais utilizados, tanto a nível comercial como a nível doméstico e têm um menor custo de instalação uma vez que não necessitam de nenhum equipamento especializado. Já os inversores centrais são tipicamente usados em projetos de grande escala e são altamente eficientes. Por último, os microinversores são instalados individualmente em cada módulo FV, correspondem a uma solução mais cara, mas pode ser o mais adequado para instalações em que os módulos possuem direções diferentes. [21]

Na escolha do inversor é importante ter em conta o nível de agregação de controlo *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), sendo preferível um inversor com um maior número de andares MPPT relativamente à potência dos inversores. Um maior número de MPPT, significa que se pode controlar de forma separada e otimizada um maior número de grupos de strings. A título de exemplo, apresenta-se de seguida o diagrama do inversor da *Huawei* que foi considerado uma das melhores soluções tecnológicas no ano de 2019 [22].

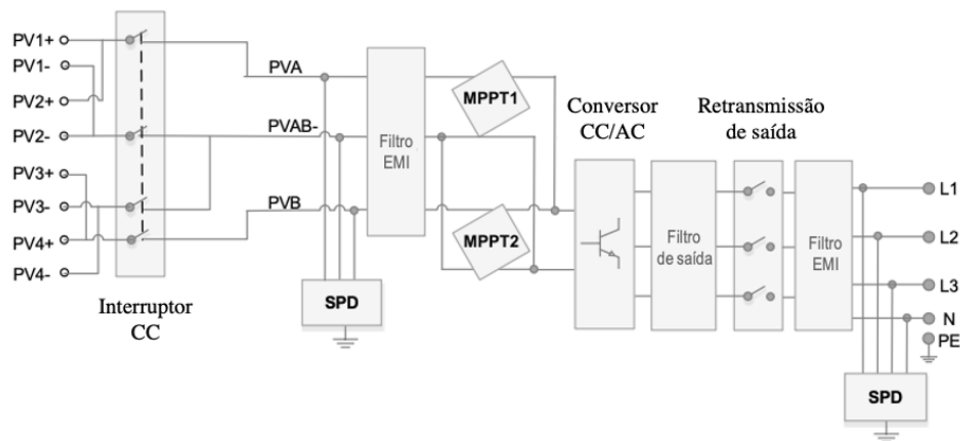


Figura 2.1: Diagrama do circuito do inversor *Huawei SUN2000*. Adaptado de [22]

O inversor da Figura 2.1 possui dois andares de eletrónica de potência (MPPT), sendo que a cada um desses andares se podem ligar duas entradas.

Dados analisados de operadores de centrais fotovoltaicas mostram que os inversores são dos sistemas de operação e manutenção mais caros na área do fotovoltaico, sendo responsáveis por 43% a 70% dos pedidos de assistência da central [23]. Posto isto, de acordo com [24], deve-se dar preferência a equipamentos que tenham os seguintes componentes:

- Interruptor bipolar CC: caso ocorra uma falha ou para uma situação de manutenção, é necessário isolar o inversor do módulo FV. O interruptor deve ser bipolar de forma a isolar o circuito positivo e negativo;
- Protecção contra descargas atmosféricas e sobretensões: devido à exposição dos sistemas fotovoltaicos, estes estão sujeitos a descargas atmosféricas diretas e a sobretensões devidas a descargas indiretas;
- Fusíveis nos dois cabos das entradas DC: as correntes de defeito podem causar danos aos equipamentos da instalação, deste modo são instalados fusíveis nos circuitos positivos e negativos dos cabos

Segundo [25], cada vez mais são utilizados sistemas de monitorização FV, estes são essenciais para enviar informações aos proprietários da instalação, para que possam operar e controlar o sistema, a fim de reduzir os seus custos de manutenção. Deve-se, portanto, dar preferência a equipamentos que tenham o maior detalhe no seu sistema de monitorização.

De acordo com a arquitetura moderna, o fluxo de trabalho de um sistema de monitorização pode ser dividido em três etapas:



Figura 2.2: Arquitetura básica do sistema de monitorização. Adaptado de [25]

A camada de aquisição é composta por vários sensores responsáveis pela obtenção de sinais dos módulos FV e de variáveis ambientais. A este nível existem diversas plataformas de *hardware* disponíveis para implementação de redes *wireless*, tais como *XBee* e *TelosB*. A informação recolhida pode ser enviada para a próxima camada através de ligações com fios ou então sem fios, utilizando *Wi-Fi*, por exemplo. A segunda camada regula os dados recebidos e guarda a informação temporariamente, sendo esta posteriormente enviada para a última camada através de uma ligação com ou sem fios. Por último, armazena-se os dados num serviço *cloud* ou num armazenamento local. Esta camada oferece uma interface gráfica para gerir e visualizar a informação adquirida. [25]

2.1.3 Qualidade e Características das Estruturas de Suporte e Seguimento

As estruturas de suporte são instaladas para dar sustentação aos módulos fotovoltaicos e podem também promover o seu agrupamento, através de interligações. Para escolher a estrutura deve-se ter em consideração a orientação e inclinação do local da instalação.

Relativamente ao material usado, tipicamente usam-se estruturas metálicas, aço inoxidável ou alumínio. Quanto à parafusaria e fixação, estas devem ser em aço inoxidável e devidamente dimensionadas para o sistema de fixação a propor. Os materiais das estruturas devem ter uma garantia de durabilidade contra a corrosão e uma certificação segundo a norma EN 1090 [26].

A influência do vento nos módulos tem especial efeito ao nível mecânico, como tal é necessário ter em consideração no dimensionamento das estruturas a pressão dinâmica do vento [27]. O equipamento deve estar preparado para aguentar, sem danos, ventos até 150 km/h, medidos na estação meteorológica mais próxima.

Ao dimensionar uma central fotovoltaica (FV), é necessário decidir qual o tipo de seguimento a implementar. Os módulos podem ter uma inclinação fixa ou vários tipos de seguimentos, para decidir qual a opção de seguimento a instalar, deve-se simular a produção e estimar quanto se

ganha com o sistema de seguimento. Esta análise prévia de custo-benefício é importante, uma vez que os seguidores solares encarecem consideravelmente o sistema FV. [27]

Embora os sistemas de seguimento permitam aumentar os níveis de produção de energia comparativamente aos módulos que se encontram fixos, como são compostos por peças móveis têm uma maior probabilidade de avaria, levando a custos de manutenção mais elevados [28].

2.1.4 Otimização da Disposição dos Equipamentos

De acordo com [29], no planeamento de um projeto fotovoltaico, a questão do sombreamento das células é especialmente difícil de prever e de eliminar. Como resultado do sombreamento, os módulos geram correntes mais baixas e, conseqüentemente, ocorrem diminuições de potência. O sombreamento pode ser classificado como:

- Sombreamento em consequência da localização: consiste no sombreamento produzido pela envolvente do edifício, por exemplo, os prédios vizinhos ou árvores;
- Sombreamento produzido pelo edifício: corresponde a sombras causadas, por exemplo, por chaminés, para-raios ou antenas no próprio edifício;
- Sombreamento temporário: como é o caso da presença de neve, de folhas e de dejetos de pássaros. De notar que, embora este tipo de sombreamento exista, não é considerado muito importante para o planeamento prévio do projeto FV.

Posto isto, é preciso garantir que o sistema fotovoltaico se encontra afastado convenientemente dos objetos em seu redor, de modo a minimizar as perdas na produção de energia [29].

Quanto ao sombreamento em sistemas FV inclinados, existe uma distância mínima a cumprir entre as filas de módulos. Essa distância está relacionada com a localização geográfica, com as dimensões do módulo, bem como a sua orientação e a inclinação relativamente ao solo [30].

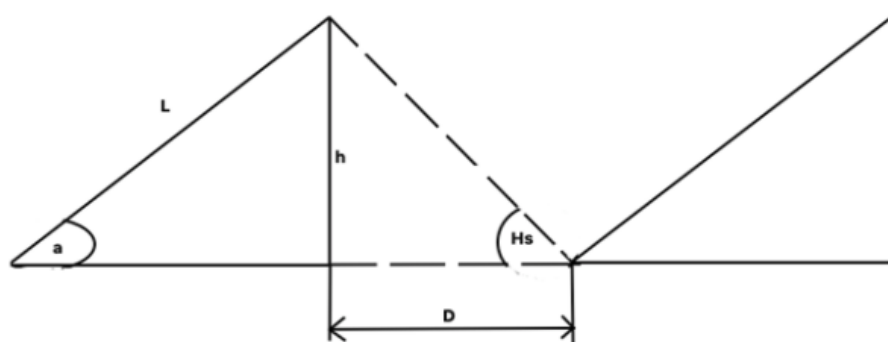


Figura 2.3: Distância entre filas de módulos [30]

Conhecida a elevação solar Hs e a altura do módulo h , que depende da inclinação a e do comprimento L , a distância entre filas vem dada por:

$$D = \frac{h}{\tan(Hs)} \quad (2.1)$$

A situação apresentada na Figura 2.3 trata-se de um exemplo para uma disposição simples dos módulos FV, porém, em casos práticos, podem surgir situações mais complexas, que não se resolvem apenas com a equação mencionada.

Relativamente ao tipo de montagem dos módulos fotovoltaicos, existem algumas soluções, sendo as mais utilizadas as montagens em telhados e as montagens no solo [31]. Apresenta-se de seguida algumas características destes tipos de montagens:

- Numa montagem em telhado, típica de médias potências, é preciso ter em consideração a orientação e a inclinação e se estas coincidem com os valores ótimos do local. Se o telhado for plano, será necessário recorrer a estruturas de suporte, caso o telhado possua inclinação os módulos podem ser assentes diretamente na telha, numa estrutura coplanar;
- Numa montagem em solo, típica de grandes potências, pode-se ter sistemas de inclinação fixa, de seguimento de eixo único ou então de seguimento de eixo duplo. Este tipo de montagem é caracterizado por ser de fácil instalação e acesso.

No que se refere ao ângulo de inclinação dos módulos FV, este afeta a quantidade de irradiação incidente na superfície do módulo e depende da posição do sol, da latitude e das características geográficas do local. Como tal, existe interesse em otimizá-lo e, ao longo dos anos, desenvolveram-se vários estudos para encontrar os ângulos de inclinação ótimos para diferentes locais [32]. Por exemplo, em Portugal, a orientação ótima de uma instalação é a direção Sul, com um ângulo de inclinação entre 20° a 35° [33].

Os sistemas fotovoltaicos são geralmente ligados numa topologia série-paralelo, onde os módulos são ligados em série, formando uma *string*, e depois várias *strings* são ligadas em paralelo para formar o sistema FV [34]. De modo a escolher o número de módulos por string, deve-se optar por uma tensão de série em torno da tensão de operação do MPPT do inversor, sendo que os módulos do mesmo MPPT devem ter igual inclinação e azimute.

Como já foi referido, o sombreamento é uma questão importante a considerar num projeto FV, uma vez que pode ser uma fonte significativa de perdas. Deste modo, a eletrónica de potência tem desenvolvido novas tecnologias para melhorar a eficiência global do sistema, como é o caso dos otimizadores (em inglês, *optimizers*) [35].

Os otimizadores de potência são basicamente conversores de corrente contínua CC-CC que são fixados na parte detrás do módulo FV e fornecem o rastreamento do ponto de potência máxima (MPPT) ao nível do módulo. Esta tecnologia pode compensar perdas devido a sombras, sujidade e envelhecimento. [36]

A viabilidade económica dos otimizadores deve ser considerada, dado que a sua integração representa um custo adicional e só proporciona benefícios caso haja perdas significativas a compensar [36]. Segundo o estudo [37], existem poucos cenários onde a utilização dos otimizadores se torna viável economicamente para o projeto. Os cenários onde as melhorias são mais significativas ocorrem quando os módulos de uma *string* têm orientações diferentes e quando existem sombras que cobrem os módulos FV durante uma grande parte do dia. Por último, também foi demonstrado que os conectores adicionais têm um elevado risco de falha, uma vez que os fabricantes dos

conectores diferem dos fabricantes dos módulos. A Tabela 2.4 resume as vantagens e desvantagens da utilização deste dispositivo eletrônico.

Tabela 2.4: Análise dos otimizadores de potência. Adaptado de [37]

Vantagens	MPPT local, rastreamento para cada módulo Desconexão do módulo para limitar a tensão do sistema em caso de falha Monitorização ao nível de cada módulo
Desvantagens	Perdas de energia adicionais: nos conectores e na eletrónica de potência interna Os conectores são uma fonte de falha potencial (incêndio ou quebra do fio) O aumento do número de componentes também aumenta o risco de falhas
Fabricantes	SolarEdge [38] Tigo [39]

Por último, num projeto FV, é necessário ter em consideração o apropriado dimensionamento dos cabos e dos conectores utilizados, estes são responsáveis por fazer a ligação dos módulos a outros componentes do sistema. É então importante que sejam de alta qualidade e à prova de condições meteorológicas adversas, como chuvas e ventos fortes [40].

2.1.5 Qualidade da Instalação Elétrica e Interligação

Um projeto fotovoltaico deve garantir a deteção seletiva de defeitos na sua instalação, sem nunca interferir com o bom funcionamento da rede. Nesse sentido, deve-se instalar, sempre que necessário, proteções na sua instalação [41]. Condicionadas à dimensão do sistema fotovoltaico, as proteções de interligação sugeridas pelo operador da rede são:

- Máximo Tensão Residual/Tensão Homopolar [ANSI 59N];
- Mínimo de Tensão Trifásica [ANSI 27];
- Máximo Tensão Trifásica [ANSI 59];
- Máximo Frequência [ANSI 81O];
- Mínimo Frequência [ANSI 81U];
- Máximo Intensidade de Fase Trifásica [ANSI 50/51];
- Máximo Intensidade de Sequência Inversa [ANSI 46].

O aumento da integração de projetos fotovoltaicos nas redes nacionais tem efeitos ao nível da estabilidade e segurança do sistema, como tal, devem ser considerados cuidadosamente antes da sua instalação [42].

Tabela 2.5: Desafios técnicos da integração FV. Adaptado de [44]

Desafio Técnico	Descrição do desafio e como este afeta a rede
Varição da Tensão	Uma questão importante devido à intermitência do recurso solar. Acontece em virtude da variação da energia solar disponível ao longo de um dia. A variação da tensão pode perturbar os equipamentos mais sensíveis e possivelmente diminuir a sua vida útil
Distorção harmónica	Os problemas de distorção e variação da tensão podem ser produzidos por harmónicos injetados na rede. Os dispositivos eletrónicos de potência e equipamentos operacionais não lineares são as principais fontes de distorção harmónica

Dada a natureza intermitente e irregular do recurso solar, a gestão da rede elétrica pode-se tornar uma tarefa mais difícil aquando da integração da produção fotovoltaica [43]. De seguida apresentam-se os maiores desafios técnicos desta integração.

A gravidade dos efeitos varia com a magnitude da penetração fotovoltaica, com a localização da central e ainda com as características elétricas do sistema de distribuição [45].

2.1.6 Variabilidade do Recurso Solar

Ao contrário da produção convencional de energia, a produção de energia solar é intermitente, uma vez que depende da condição meteorológica e da estação do ano. A variabilidade do recurso solar tem duas origens: uma é previsível e rastreável, corresponde ao movimento aparente do sol e à distância da Terra ao sol; a outra é mais difícil de prever e rastrear, relativa ao movimento das nuvens e dos sistemas meteorológicos. [46]

No que toca à magnitude da variabilidade do recurso solar, pode-se recorrer à plataforma *PVGIS* para simular o seu valor num determinado local [47]. Usando como exemplo o caso de Portugal, estima-se que a variabilidade de ano para ano do recurso solar é de cerca de 4%. Já em termos de variação mensal, observa-se uma variabilidade máxima de aproximadamente 50%, a qual acontece tipicamente entre o mês de Janeiro e o mês de Julho.

À medida que a irradiação solar atravessa a atmosfera sofre diferentes processos de absorção, dispersão ou difusão, que resultam numa diminuição da irradiação recebida na superfície da Terra [48]. A irradiação que chega ao nível do solo pode então ser dividida em três componentes [27]:

- Irradiação direta: corresponde aos raios solares recebidos diretamente do sol, não sofrem atenuação ao passar pela atmosfera;
- Irradiação difusa: corresponde aos raios não diretos e dispersos pela a atmosfera. Depende essencialmente das nuvens, como tal é muito variável no tempo;

- Irradiação refletida no albedo: tem origem na reflexão da irradiação incidente na superfície, depende das características do solo. Nem sempre é tida em consideração esta componente.

De notar que os sistemas de concentração solar praticamente não absorvem a irradiação difusa, como tal, nestes casos é necessário um sistema de seguimento para que esta tecnologia esteja perfeitamente orientada para o sol, de modo a captar a irradiação direta [49].

2.2 Avaliação de Desempenho de Produção

Com o avançar da tecnologia fotovoltaica, cada vez mais são os estudos que se focam na avaliação do desempenho de produção, com o objetivo de maximizar o seu desempenho. Neste subcapítulo, apresentam-se os tipos de avaliação de desempenho existentes e ainda algumas formulações possíveis para os indicadores de desempenho utilizados.

2.2.1 Tipos de Avaliação de Desempenho

O desenvolvimento da indústria fotovoltaica resultou em novos modelos e cenários de negócios para os projetos FV. Por um lado, devido à competitividade de preços, é essencial assegurar o desempenho a longo prazo da instalação, para garantir a sua rentabilidade. Por outro lado, tornou-se um padrão para gerir os portfólios das empresas. [50]

Além da garantia a longo prazo, considera-se igualmente importante o rendimento a curto prazo, por exemplo, ao final do primeiro ano, o que tem implicações em termos de degradação dos componentes, de Operação e Manutenção (O&M), de garantias e também de substituições de equipamentos. [50]

Existem três momentos de avaliação de desempenho de produção de um sistema FV:

- Na entrega da instalação, corresponde ao Certificado de Aceitação Provisória (PAC), ocorre num curto espaço de tempo, tipicamente nas duas primeiras semanas [51];
- Após um ou dois anos de funcionamento, corresponde ao Certificado de Aceitação Final da instalação (FAC), é uma avaliação de período mais longo [51];
- Operação e Manutenção (O&M), corresponde a uma avaliação contínua do parque, para efeitos de monitorização e gestão. Pode ser de perfil regular, por exemplo, planeia-se para que ocorra duas vezes por ano, ou então numa situação não programada, quando surge uma avaria.

A diferença entre o PAC e o FAC, além do período de tempo, é que o PAC tem como objetivo demonstrar que a instalação está preparada para entrar em funcionamento, já o FAC tem como fim assegurar que, após um período mais longo de funcionamento, a instalação cumpre o desempenho acordado [51].

Como em qualquer outra ciência, a engenharia fotovoltaica utiliza indicadores de desempenho para qualificar o comportamento dos seus sistemas. O indicador mais comum para os testes de

desempenho mencionados anteriormente é o *Performance Ratio* (PR), o qual será abordado com mais detalhe no Subcapítulo 2.2.2.

Atualmente, os serviços de O&M são reconhecidos como algo essencial ao projeto, dado que estes aumentam o desempenho do sistema FV. O processo de manutenção pode ser dividido em três tipos:

- **Manutenção preventiva:** corresponde a manutenções planeadas para manter os equipamentos em perfeitas condições de funcionamento. Este serviço envolve normalmente uma inspeção, uma limpeza e troca de óleos no filtro do sistema FV [52]. A manutenção preventiva reduz a probabilidade de falhas, aumentando a eficácia global do sistema;
- **Manutenção corretiva:** trata-se de uma manutenção realizada para retificar e reparar equipamentos que tenham apresentado falhas. Este tipo de manutenção ocorre quando é recebido algum alarme de avaria [53];
- **Manutenção preditiva:** permite prever falhas e monitorizar o desempenho do sistema, consiste num acompanhamento periódico de equipamentos, através de dados medidos anteriormente em inspeções. Tem como objetivo determinar de forma antecipada a necessidade de manutenção, reduzindo assim o trabalho de emergência para reparar equipamentos [54].

O interesse pela manutenção preditiva tem aumentado nos últimos anos e, como tal, tem-se apostado no desenvolvimento de metodologias para este tipo de manutenção. A Figura 2.4 apresenta um resumo das técnicas atuais.



Figura 2.4: Abordagens de manutenção preditiva. Adaptado de [54]

2.2.2 Indicadores de Desempenho

Como as centrais fotovoltaicas são instaladas em diferentes locais do mundo e com diferentes potências, é importante ter uma norma comum para a avaliação de desempenho dos sistemas FV. A *International Electrotechnical Commission* (IEC) desenvolveu a norma 61724 que fornece os padrões pelos quais o desempenho de um sistema FV pode ser avaliado [55]. Existem alguns indicadores de desempenho, porém o *Performance Ratio* é considerado o mais importante para avaliar o desempenho de uma central FV [56].

De acordo com [57], o PR é um indicador que tem ganho ampla aprovação para avaliar globalmente o desempenho dos sistemas FV. Trata-se de um indicador adimensional que varia entre 0 e 1, sendo que quanto maior o seu valor, melhor é o desempenho do sistema em comparação com o valor de produção que era expectável. Este indicador permite a comparação de desempenho do mesmo sistema em diferentes momentos de operação e entre sistemas com diferentes características.

Apesar de permitir a comparação de sistemas instalados em locais diferentes, é na avaliação de desempenho para a mesma central que o PR tem a maior utilidade, podendo ser utilizado em:

- Comparação de diferentes propostas e sistemas para o mesmo projeto, sendo utilizado na avaliação comparativa de propostas de centrais fotovoltaicas, antes da instalação, assumindo as mesmas condições meteorológicas e condições de operação semelhantes;
- Comparação da produção de uma mesma central em períodos diferentes, com condições meteorológicas e condições de operação diferentes, sendo utilizado para comparar diferentes anos de produção de uma central;
- Avaliação do desempenho da central, no período de teste para entrega, no início de funcionamento da central (PAC);
- Avaliação do desempenho da central, no período de teste para entrega definitiva, no final do período de garantia de instalação da central (FAC);
- Avaliação do desempenho da central, em períodos de monitorização continuada da central, sendo útil para a gestão de manutenção e para a análise e deteção de falhas.

A formulação matemática do PR poderá ter diferentes níveis de detalhe, esse nível, por sua vez, condiciona a independência da avaliação do desempenho relativamente a um conjunto de variáveis que normalmente afetam a produção. Por exemplo, a avaliação do desempenho de forma independente:

- Da capacidade da central (kWp);
- Das condições meteorológicas (irradiância, temperatura, entre outras);
- De períodos de falhas da rede ou de outras medidas anómalas.

Este indicador pode ser calculado através do seguinte rácio:

$$\text{Performance Ratio}(PR) = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2.2)$$

Onde, Y_f corresponde ao número de horas equivalentes de produção da central, ver Equação 2.3, e Y_r corresponde ao número de horas equivalentes de irradiação incidente no plano do módulo, ver Equação 2.4.

$$Y_f = \frac{\text{Energia de saída}}{\text{Potência nominal}} = \frac{E(kWh)}{P_{std}(kW)} \quad (2.3)$$

$$Y_r = \frac{\text{Irradiação total no plano}}{\text{Irradiância referência}} = \frac{H_p(kWh/m^2)}{G_{std}(kW/m^2)} \quad (2.4)$$

A irradiância de referência é tipicamente considerada de 1000 W/m^2 .

A formulação do PR pode assumir várias formas, contudo mantém o mesmo valor em qualquer uma delas. Por exemplo, pode-se provar que o PR corresponde à eficiência do sistema (η):

$$PR = \frac{\frac{E(kWh)}{P_{std}(kW)}}{\frac{H_p(kWh/m^2)}{G_{std}(kW/m^2)}} = \frac{\frac{\frac{E(kWh)}{P_{std}(kW)}}{G_{std}(kW/m^2)}}{H_p(kWh/m^2)} = \frac{\text{Produção por } m^2}{\text{Irradiação por } m^2} = \eta \quad (2.5)$$

É também possível provar que o PR corresponde ao quociente entre a produção real e a estimativa da produção. A estimativa da produção poderá ser uma formulação simples, como a apresentada na Equação 2.6, onde é simplesmente proporcional à irradiação. Todavia, pode-se realizar uma formulação mais complexa, onde se incluem os efeitos das variáveis meteorológicas, perdas na rede ou perdas noutros componentes do sistema.

$$PR = \frac{\frac{E(kWh)}{P_{std}(kW)}}{\frac{H_p(kWh/m^2)}{G_{std}(kW/m^2)}} = \frac{E(kWh)}{P_{std}(kW) \times \frac{H_p(kWh/m^2)}{G_{std}(kW/m^2)}} = \frac{\text{Produção real (kWh)}}{\text{Estimativa de produção (kWh)}} \quad (2.6)$$

Para períodos de monitorização curtos, são aconselhadas simulações de produção mais complexas. Porém, para períodos longos, o efeito das diversas variáveis meteorológicas é cancelado, resultando numa aproximação aceitável, com o PR na mesma ordem de grandeza. As perdas no sistema podem ser incluídas multiplicando a estimativa de produção por fatores de eficiência que se pretendam considerar. De notar que as inclusões dos fatores de eficiência aproximam o valor da estimativa de produção do valor real, elevando assim o valor do PR.

Geralmente, o *Performance Ratio* é calculado com base em energias, seja a energia real ou a energia estimada, no entanto, podem-se obter exatamente os mesmos valores utilizando potências médias \bar{P} e irradiâncias médias \bar{G} de um conjunto de medidas sincronizadas.

$$PR = \frac{\frac{E(kWh)}{P_{std}(kW)}}{\frac{H_p(kWh/m^2)}{G_{std}(kW/m^2)}} = \frac{\frac{\bar{P}(kW)}{P_{std}(kW)}}{\frac{\bar{G}_p(kW/m^2)}{G_{std}(kW/m^2)}} = \frac{\bar{P}(kW)}{P_{std}(kW) \times \frac{\bar{G}_p(kW/m^2)}{G_{std}(kW/m^2)}} = \frac{\text{Potência média real (kW)}}{\text{Pot. média estimada (kW)}} \quad (2.7)$$

A formulação baseada em valores médios sincronizados de potências e irradiâncias, como mostrado na Equação 2.7, permite uma maior flexibilidade e clareza na formulação do procedimento, permitindo assim excluir medidas não válidas mais facilmente. As medidas não válidas poderão ser:

- Medidas com irradiância abaixo de um determinado valor, normalmente abaixo do limite mínimo de arranque dos inversores, como por exemplo, 50 W/m^2 ;
- Medidas de períodos de manutenção ou intervenção no sistema;
- Medidas de períodos com falhas ou anomalias da rede;
- Medidas com erros na medição de potência ou irradiância.

Existem alguns casos em que os sistemas FV possuem subsistemas, com várias inclinações, o que torna difícil a definição da irradiância em plano inclinado (G_p). Nestes casos, é possível utilizar a irradiância em plano horizontal (G_h). Porém, com esta aproximação, em parte dos meses do ano a estimativa será por excesso e noutra parte a estimativa será por défice, o que pode ser corrigido usando um coeficiente de ajuste mensal ($COEF_m$), criado especificamente para a central.

$$PR = \frac{\frac{\bar{P}(kW)}{P_{std}(kW)}}{COEF_m \times \bar{G}_h(kW/m^2)}}{G_{std}(kW/m^2)} \quad (2.8)$$

Para uma avaliação comparativa, pode comparar-se o *Performance Ratio* real monitorizado (PR_r) com o *Performance Ratio* estimado (PR_e), usado como referência. Geralmente, nas avaliações PAC, FAC ou nos contratos de manutenção existe um compromisso de PR_r mínimo, abaixo do qual existem penalizações. Também poderão existir contratos indexados ao desvio de PR_r mínimo.

Uma alternativa para avaliar o desvio de desempenho, é estimar o desvio de produção relativamente a um valor de referência ou compromisso do instalador. Esse desvio de energia (DE) pode ser calculado pela diferença entre a potência média real \bar{P}_r e a potência média estimada \bar{P}_e , em períodos sincronizados, multiplicada pelo número de horas da avaliação N_h (Equação 2.9). O DE pode ser penalizado ou premiado de forma contratual, multiplicando pelo valor associado à energia produzida pela central.

$$DE = N_h \times (\bar{P}_r - \bar{P}_e(\bar{H}_h)) \quad (2.9)$$

A análise do *Performance Ratio* apresentada nesta secção é baseada em [58], no entanto, existem muitas outras interpretações sobre o PR. O artigo [57] realiza uma revisão bibliográfica sobre este indicador de desempenho, apresentando várias abordagens possíveis à sua formulação. Vários autores introduziram novos fatores no cálculo do PR, como por exemplo, *Haeberlin* adicionou um fator de correção para a temperatura e outro para a produção [59].

2.3 Detecção de Falhas

A produção de energia FV, devido às condições de operação ao ar livre e aos potenciais danos no fabrico, transporte e instalação, pode sofrer várias falhas e, conseqüentemente, degradar o desempenho do sistema. As estratégias típicas de deteção e diagnóstico de falhas num sistema FV podem ser divididas em duas categorias: deteção visual e deteção automática, sendo esta última uma grande aposta na atualidade devido ao potencial existente nessa área para desenvolver sistemas cada vez mais avançados.

Inicialmente, neste subcapítulo, serão apresentadas as falhas mais comuns nos sistemas FV, seguidas das principais causas de degradação de desempenho. Por último, apresentam-se as técnicas de deteção visual e as técnicas de deteção automática.

2.3.1 Tipos de Falhas

Esta secção teve como base o artigo [60], o qual apresenta uma divisão das falhas do sistema FV em: falhas do lado de Corrente Contínua (CC) e falhas do lado de Corrente Alternada (CA) (Figura 2.5). As primeiras ocorrem em componentes de produção de energia, enquanto que as falhas do lado CA acontecem em conversores de potência e elementos da transmissão.

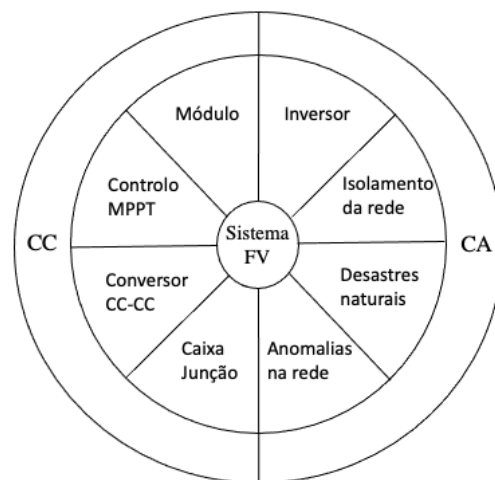


Figura 2.5: Classificação das falhas de um sistema FV. Adaptado de [60]

2.3.1.1 Falhas do Lado CC

As falhas que ocorrem do lado CC têm diferentes características e podem ser ao nível do módulo, do controlo MPPT, do conversor CC-CC ou então ao nível da caixa de junção.

Começando pela análise das falhas ao nível do módulo FV, existem as seguintes categorias: falhas de desajuste, falhas assimétricas, falhas devido ao aparecimento de arco elétrico, falhas no diodo de *bypass* e, por último, falhas devido a descargas atmosféricas.

As falhas de desajuste podem ser temporárias ou permanentes e têm um efeito destrutivo na longevidade e eficiência do módulo [61] [62]. As falhas temporárias correspondem a situações de sombreamento parcial, presença de neve ou ainda diferentes intensidades de irradiação ao longo de um dia. Já as falhas permanentes em módulos FV podem ser devido a pontos quentes, quebras e fissuras, delaminação, descoloração, entre outras (na secção 2.3.3 serão observadas algumas destas falhas).

As falhas assimétricas podem ocorrer numa *string* ou entre duas *strings*, como demonstrado na Figura 2.6. A falha assimétrica pode ser de dois tipos:

- Falha entre linhas: se ocorrer uma ligação acidental entre dois nós do mesmo *array* (*array* corresponde ao conjunto de *strings* ligadas ao mesmo inversor);
- Falha entre uma linha e a terra: se ocorrer uma ligação entre um condutor e a terra ou então se um condutor entrar em contacto com o neutro.

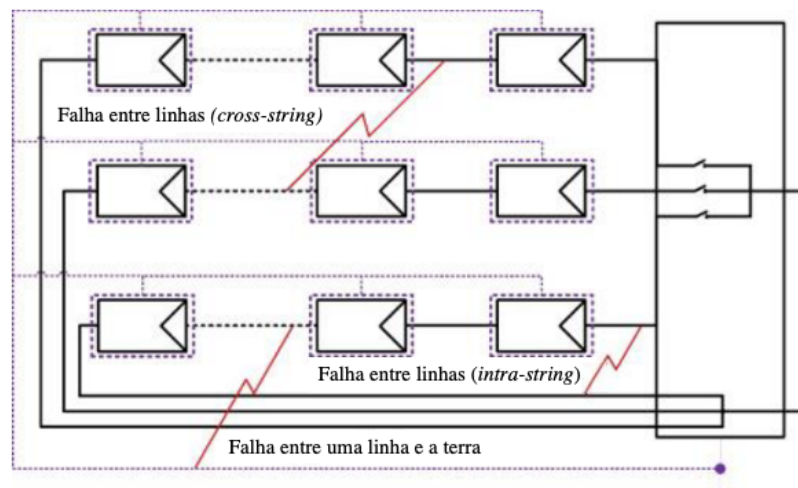


Figura 2.6: Defeitos assimétricos num sistema FV. Adaptado de [63]

Uma falha entre linhas corresponde a uma ligação acidental de baixa resistência que se estabelece entre dois pontos de potencial diferente. Num sistema FV, uma falha deste tipo é normalmente definida como uma falha de curto-circuito entre módulos, a qual pode ser causada por uma falha de isolamento dos cabos ou também por uma falha entre linhas dentro da caixa de junção, devido à entrada de água ou corrosão.

As curvas características I-V da Figura 2.7 podem ser utilizadas para melhor entender o efeito de uma falha de curto-circuito entre *strings*. Antes da falha, todo o *array* opera no ponto (V_{MPP}, I_{MPP}) . Após a falha, o ponto de funcionamento do *array* passa para (V_F, I_{array}) , onde operam as $(n-1)$ *strings* sem falha. A *string* defeituosa opera em (V_F, I_{back}) , funcionando como uma carga.

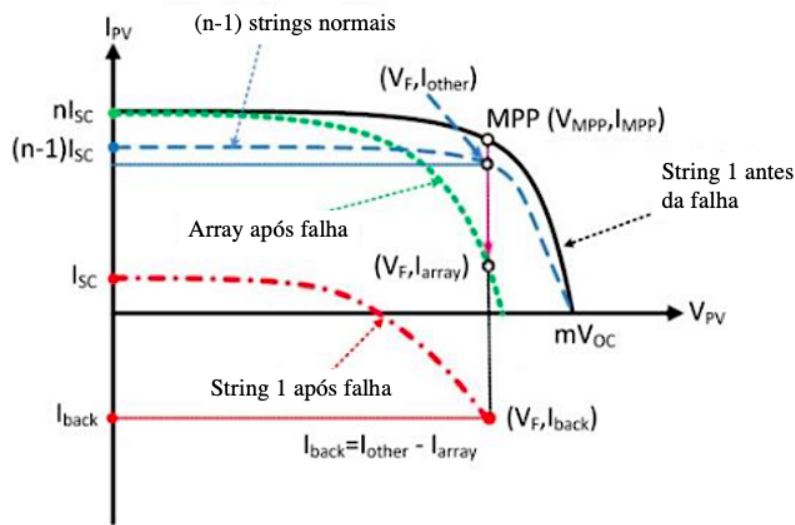


Figura 2.7: Curvas I-V antes e após falha entre strings. Adaptado de [60]

Já uma falha à terra num sistema FV ocorre quando se cria um caminho elétrico entre um condutor da *string* e a terra. Tais falhas são geralmente resultado da degradação mecânica, elétrica ou química de componentes fotovoltaicos ou erros cometidos durante a instalação [64] [65]. O cenário de defeito à terra pode ser melhor compreendido através da análise da Figura 2.8.

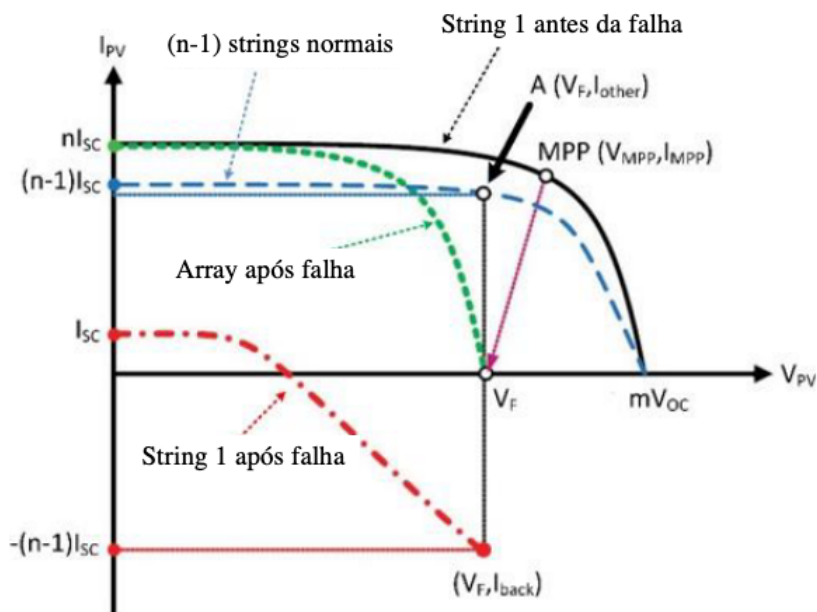


Figura 2.8: Curvas I-V antes e após falha à terra. Adaptado de [60]

Antes da falha, todo o *array* opera no ponto (V_{MPP}, I_{MPP}) . Após a falha, as características I-V alteram-se subitamente e V_{MPP} cai para V_F . Como V_F é a tensão de circuito aberto do *array* com falha, o *array* fica em circuito aberto, logo não chega corrente ao inversor FV. Todavia, a corrente

em cada *string* não é nula, as $(n-1)$ *strings* normais operam no ponto A (V_F, I_{other}). A corrente I_{other} não tem outro caminho a percorrer se não o de voltar a alimentar a *string* 1. Como resultado, a corrente de curto-circuito na *string* defeituosa torna-se $(n-1)I_{SC}$ e flui para o ponto de falha na terra. Pode-se concluir que uma falha à terra é, de facto, um caminho de baixa impedância não intencional entre um condutor de corrente e a terra.

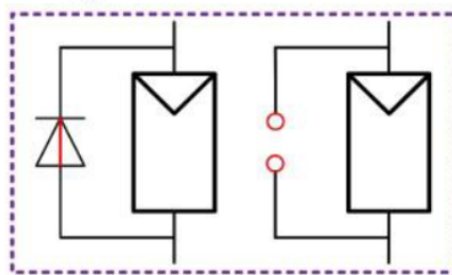
Relativamente ao arco eléctrico, o seu aparecimento está relacionado com o elevado número de contactos eléctricos existentes num sistema FV. Existe um risco significativo de situações perigosas que podem ser iniciadas pela ocorrência de um arco eléctrico, como por exemplo, um incêndio. As falhas devido ao aparecimento do arco eléctrico, segundo [66], podem ser classificadas principalmente em dois tipos:

- Falha de arco em série: ocorre quando há descontinuidade em qualquer condutor de corrente resultante de danos na célula, corrosão dos conetores, desconexão da soldadura, etc;
- Falha de arco em paralelo: ocorre principalmente devido a avarias do isolamento.

Sobre os díodos de *bypass*, sabe-se que estes são inseridos em paralelo com um certo número de células num módulo FV e impedem o aparecimento de tensões inversas elevadas nas células solares [61]. Os díodos de *bypass* têm a função permitir o *bypass* de células defeituosas ou com sombra, evitando assim o aparecimento de pontos quentes [67].

As falhas dos díodos de *bypass* invertidos resultam de ligações incorretas feitas pelo operador. Uma falha de curto-circuito no díodo é causada por uma má ligação entre as células FV ou devido a defeitos de fabrico. Já uma falha de circuito aberto no díodo ocorre geralmente como efeito secundário das falhas entre linhas.

Díodo de bypass em curto-circuito



Díodo de bypass em circuito aberto

Figura 2.9: Díodo de *bypass* de circuito aberto e em curto-circuito. Adaptado de [60]

Por último, ao nível do módulo, existem falhas devido a descargas atmosféricas, estes correspondem a descargas eléctricas temporárias com correntes elevadas. Uma central FV está exposta a este tipo de descargas que podem causar sérios danos físicos e mecânicos nos componentes FV. Quando uma descarga atmosférica atinge a central FV, esta cria correntes e tensões transitórias em todo o sistema, as quais se tornam visíveis nos terminais dos equipamentos e provocam falhas dielétricas nos componentes do sistema FV [68] [69].

As falhas do lado CC também podem ocorrer ao nível do MPPT, este é um dispositivo de eletrónica de potência responsável por maximizar a extração de energia dos *arrays* FV. Se ocorrer uma falha no sistema de controlo MPPT, o ajuste da tensão e corrente de saída pode ser defeituoso, o que resulta numa diminuição desses valores. No momento da ocorrência deste tipo de erro, a potência de saída torna-se muito baixa [66]. A falha de controlo do MPPT pode ser dividida em duas partes: na avaria dos sensores ou nos algoritmos de controlo MPPT.

O conversor CC-CC, também designado por *optimizer*, possui componentes de eletrónica de potência frágeis, como os dispositivos de comutação de potência, condensadores, conetores, resistências, entre outros. Estudos demonstram que 66% das falhas num sistema FV ocorrem na fase de transformação do nível de potência, como tal é de esperar que a inclusão deste equipamento aumente a probabilidade de ocorrência de falhas [70].

Para terminar a análise das falhas do lado CC, importa referir o papel das caixas de junção, estas são necessárias em todas as partes CC do sistema FV para ligarem os componentes e elementos. Por conseguinte, falhas na caixa de junção podem ocorrer em qualquer parte do sistema e podem ser devido a uma má fixação da caixa de junção à folha traseira, penetração de humidade, corrosão das ligações, má montagem ou ainda devido a degradação térmica [71].

2.3.1.2 Falhas do Lado CA

Tal como ilustrado na Figura 2.5, as falhas do lado CA podem ser ao nível do inversor, devido a anomalias na rede, modo de isolamento da rede ou ainda devido a desastres naturais.

Começando pela análise do inversor, sabe-se que falhas neste dispositivo podem conduzir a perdas significativas de produção, uma vez que estes são responsáveis pela conversão e alimentação da energia à rede. Identificam-se de seguida alguns dos problemas mais comuns em inversores:

- Instalação incorreta: pode variar desde a sua ligação física incorreta até à programação incorreta dos inversores. A instalação deve ser verificada na entrega do parque FV, através da realização de testes;
- Sobreaquecimento: as altas temperaturas levam a uma redução significativa da produção e podem mesmo resultar numa paragem da produção, caso a temperatura máxima de funcionamento seja atingida. É altamente aconselhável verificar regularmente se o sistema de arrefecimento ou ventilação está a funcionar corretamente;
- Falha de isolamento: ocorre como resultado de um curto-circuito entre várias partes do circuito e o inversor emite um alarme de isolamento. No caso de uma falha de isolamento, o inversor deixa de funcionar à sua capacidade máxima, podendo mesmo deixar de funcionar por completo;
- Inversor não reiniciar após falha: após uma falha na rede, o inversor deve ser capaz de se reiniciar. Por exemplo, os picos de tensão que ocorrem durante uma desativação súbita podem desencadear cortes no sistema, se o inversor não se reiniciar automaticamente, uma

equipa de serviço terá então de ir ao local para reiniciar o sistema, o que conduzirá a perdas de produção desnecessárias.

Relativamente às anomalias na rede, podem ser identificados dois tipos de falhas: *blackout* total e interrupção da rede (relâmpago e tensão desequilibrada) [72]. Para uma central FV ligada à rede, se ocorrer uma falha na rede, esta deixa de funcionar, por uma questão técnica e por uma questão de segurança e regulamentação. As regras da concessionária exigem que, em caso de falha de energia, os módulos se desliguem automaticamente [73].

Sobre o modo de isolamento, este acontece quando um sistema FV alimenta uma secção do sistema de serviço público que foi isolada da fonte de tensão pública. Este fenómeno ocorre quando a rede de abastecimento sofre uma interrupção imprevisível, tal como um corte de tensão, um curto-circuito ou então uma falha no equipamento [74] [75]. O modo de isolamento, também denominado por operação em ilha, pode ser de dois tipos: intencional, típico para fins de manutenção, ou não intencional, ou seja, algo não planeado e que pode causar impactos graves na estabilidade do sistema de energia [75].

Para terminar a análise de falhas do lado CA importa referir o impacto dos desastres naturais, estes são fenómenos incontrolláveis que podem danificar o sistema elétrico e causar perturbações no seu funcionamento. Como resultado destas perturbações, tanto a frequência como a tensão aumentam instantaneamente e pode ocorrer um *blackout* no sistema de energia.

2.3.2 Causas de Degradação de Desempenho

De acordo com a *National Renewable Energy Laboratory*, o desempenho dos módulos tende a piorar ao longo dos anos, devido a elementos inevitáveis [76]. As causas de degradação podem desencadear diversos efeitos nos módulos FV, os mais comuns serão ilustrados na secção 2.3.3.

São vários os laboratórios que realizam testes para avaliar a fiabilidade dos módulos, como é o caso do laboratório PVEL [9], já apresentado na Tabela 2.1. Os testes realizados nesses laboratórios sujeitam os módulos às principais causas de degradação de desempenho:

- *Stress* térmico: durante os mais de 20 anos de vida útil de uma central FV, os componentes dos módulos sofrem várias expansões e contrações, mesmo em situações de clima moderado. As variações térmicas ocorrem entre o calor típico do dia e o frio da noite ou, ainda, com as mudanças de estações. O *stress* térmico, ao longo de muitos anos, pode danificar as soldaduras e as conexões dos circuitos internos das células;
- Calor húmido: embora altas temperaturas e humidade sejam mais comuns em regiões tropicais, os módulos FV em climas moderados, também experimentam períodos de temperaturas elevadas e humidade. Estas condições enfraquecem a aderência das diferentes camadas de um módulo, o que reduz o rendimento energético e afeta o desempenho global do sistema;
- *Stress* mecânico: ao longo de vida útil dos módulos, estes são sujeitos a várias forças mecânicas: no seu transporte, instalação, manutenções ou, então, em situações de neve pesada ou

ventos fortes. Quando sujeitos a estas forças mecânicas, os componentes do módulo podem entrar em *stress* mecânico e quebrar. Após a fissura, podem ocorrer situações de degradação do desempenho, como a entrada de humidade e a corrosão da célula;

- Tensões elétricas: o aparecimento de tensões elétricas elevadas pode provocar falhas nos circuitos elétricos. No caso de um módulo estar sombreado, a sua tensão inversa sobe bastante, provocando correntes inversas elevadas que incrementam a temperatura para valores que podem destruir o módulo.

2.3.3 Detecção Visual de Falhas

A inspeção visual tem como objetivo identificar os vários tipos de degradação que podem ser visualmente observáveis num módulo FV e, embora seja uma abordagem simples, se for realizada periodicamente, é uma ferramenta importante para detetar algumas das falhas existentes [77].

Este subcapítulo teve como base o artigo [77], o qual observa as questões de degradação de desempenho que os módulos FV sofrem ao longo do tempo. A análise de degradação revela-se então um parâmetro importante a ser considerado, não só do ponto de vista económico como também para planear o tempo de vida útil do sistema [78]. As anomalias mais comuns de se observarem nos módulos FV correspondem à descoloração da camada encapsulante, delaminação, corrosão, quebras e fissuras e pontos quentes.

A descoloração da camada encapsulante é dos defeitos mais detetados nos módulos, o que pode ser explicado pelo facto de ser facilmente perceptível numa inspeção visual [79]. As principais causas da descoloração são a qualidade da camada encapsulante, temperatura alta e humidade no local da instalação FV. Estas condições resultam então num escurecimento da superfície do módulo, como mostrado na Figura 2.10.

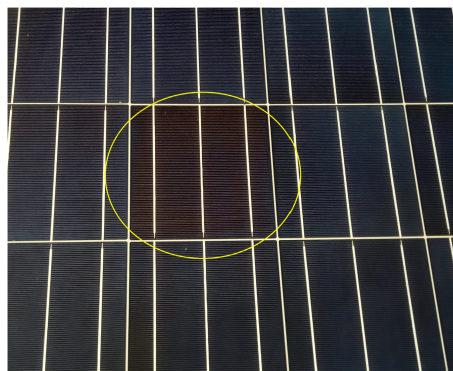


Figura 2.10: Descoloração num módulo FV [77]

A descoloração da camada encapsulante afeta negativamente a intensidade da energia solar convertida em eletricidade [80]. A transparência da camada encapsulante muda para tons mais acastanhados, o que leva a uma redução da transmissão da luz até à célula, resultando numa degradação de desempenho [81].

A delaminação é também uma falha frequentemente observada numa inspeção visual, esta consiste na perda de aderência entre as diferentes camadas de um módulo FV [82]. A perda na força de adesão pode ser atribuída a múltiplos fatores, como por exemplo, durante o fabrico, podem ocorrer imprecisões na fase de laminação, parâmetros de processamento inadequados (temperatura e pressão) ou até mesmo a presença de impurezas [81]. A utilização de material de pouca qualidade também pode resultar nessa perda de aderência.

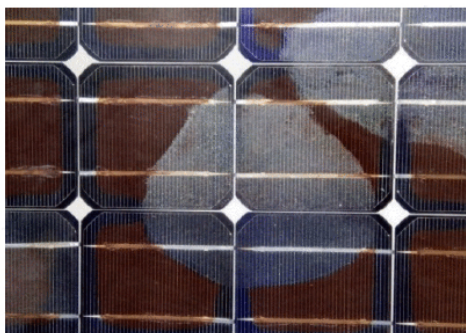


Figura 2.11: Delaminação num módulo FV [78]

A degradação dos módulos devido à delaminação produz dois efeitos nas células afetadas: aumentam a reflexão da luz incidente e aumentam a penetração de água na estrutura. Como se observa na Figura 2.11, a área delaminada cria espaço para a acumulação de humidade, o que pode acelerar a corrosão e descoloração da célula. Além disso, a delaminação provoca uma diminuição de condutividade térmica e, conseqüentemente, a temperatura local das áreas afetadas é mais elevada do que nas áreas não afetadas [83] [84].

Quanto à corrosão, esta pode acontecer devido a infiltrações de humidade no módulo FV, por meio da extremidade laminada ou da camada posterior [85]. A presença da humidade na estrutura do módulo reduz a resistência elétrica do material e resulta na degradação do desempenho, uma vez que aumenta a corrente de fuga. Também é possível que a corrosão resulte da perda de aderência entre a armação metálica e as células FV.

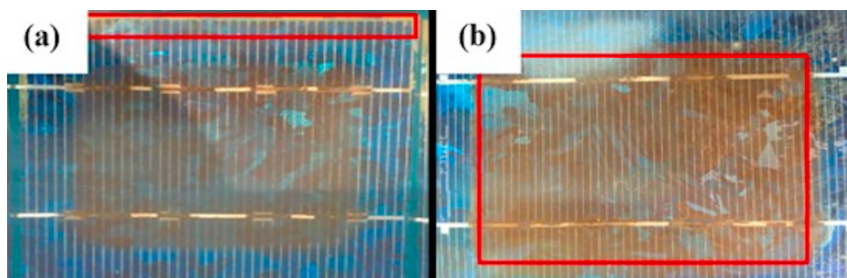


Figura 2.12: Situações de corrosão em (a) no extremo e em (b) no centro da célula [86]

As quebras e fissuras dos módulos FV também são um fator de degradação importante e, se forem suficientemente grandes, podem ser detetadas através de inspeção visual. As quebras e

fissuras podem-se formar na instalação e manutenção, porém são mais frequentes de ocorrer no transporte [87]. Embora o módulo quebrado consiga funcionar corretamente, o risco de infiltração de humidade e de ocorrer um choque elétrico irá aumentar.



Figura 2.13: Vidro de um módulo FV com quebras e fissuras [77]

Na Figura 2.13, as fissuras são facilmente observáveis à vista desarmada, contudo existem situações de microfissuras que não são capazes de se detetarem a olho nu. Este tipo de fissuras pode ocorrer durante o processo de fabrico, quando se aplicam tensões mecânicas e térmicas aos módulos. A microfissura pode-se tornar maior quando o módulo é colocado em condições exteriores [88]. A presença de quebras e fissuras degrada a potência de saída e acelera o aparecimento de outras falhas de degradação, como é o caso da corrosão e descoloração [85].

O fenómeno do ponto quente (*hot spot*, na terminologia inglesa) corresponde a um aquecimento generalizado da célula FV que fica sujeita a uma temperatura superior à das regiões vizinhas [89]. A causa desta falha está frequentemente relacionada com situações de sombras parciais nas células [78].

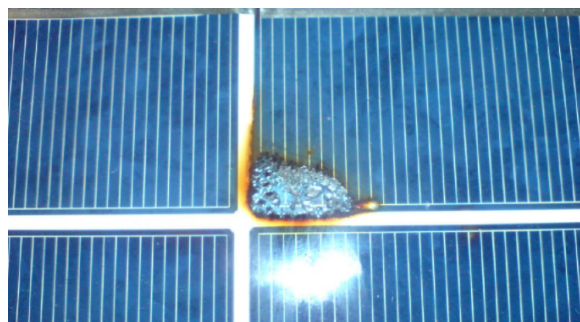


Figura 2.14: Ponto quente detetado num módulo FV [90]

Quando uma célula FV é afetada pelo sombreamento ou por outra falha, produz uma tensão inversa, que se torna igual e oposta à tensão das outras células ligadas em série, criando assim uma divergência de correntes. Posto isto, a célula que está afetada comporta-se como uma carga para as restantes células, o que provoca uma elevada dissipação térmica, formando o ponto quente (ver Figura 2.14).

2.3.4 Detecção Automática de Falhas

A análise automática de falhas pode ser realizada através de várias metodologias, sendo que as mais solicitadas incluem métodos baseados em dados. São vários os tipos de dados que podem ser usados, como medições elétricas, dados ambientais ou imagens de módulos [91].

Quanto ao tipo de informação que é analisada numa deteção automática, destacam-se de seguida as mais utilizadas:

- Informação Elétrica, pode ser medida de forma contínua ou então resultar de uma medição específica, em modo experimental ou de teste;
- Imagem de Eletroluminescência (EL), corresponde a uma imagem processada ao nível da célula ou do módulo FV;
- Imagem de Infravermelhos (IV), corresponde a uma imagem térmica ao nível da célula, do módulo ou até mesmo do sistema FV completo;
- Informação por Ultrassons, resulta da propagação de ondas sonoras ao longo do módulo FV para detetar alterações nos seus componentes.

A deteção automática de falhas tem dois aspetos fundamentais: o tipo de informação usado e a técnica utilizada para o processamento computacional. A técnica utilizada para a deteção associa-se à fonte de informação considerada e são várias as técnicas computacionais para processamento da informação.

De modo a detetar automaticamente as falhas num sistema FV, recorre-se à metodologia de *Machine Learning* (ML), também denominada por técnica de aprendizagem automática. Ao longo dos anos, vários algoritmos de ML têm sido aplicados, tais como Redes Neurais Artificiais, Sistemas de *Fuzzy-Logic*, Técnicas baseadas em Árvores de Decisão, entre outras. As diversas técnicas de ML processam diferentes tipos de informação.

2.3.4.1 Informação Elétrica

Segundo [60], ao longo do tempo foram desenvolvidos vários métodos de deteção de falhas com base em parâmetros elétricos. Nesta categoria de deteção de falhas, são necessárias medições elétricas diretas, de irradiância e meteorológicas, e também se utilizam modelos de circuito e de simulação. Dentro do método da caracterização elétrica existem algumas técnicas possíveis, sendo as mais utilizadas a análise das perdas de energia e a análise da curva característica I-V.

Relativamente à técnica da análise das perdas de energia, também designada por análise de desempenho, esta baseia-se na comparação da potência média real relativamente à potência média estimada. Realiza-se uma avaliação ao desvio de energia, como já demonstrado na Equação 2.9 da secção 2.2.2. Enquanto que a produção real é medida, a produção estimada pode ser realizada de diversas formas.

A análise de desempenho pode ser realizada através da avaliação de indicadores de desempenho, como o desvio de energia (DE) e o *Performance Ratio* (PR). Deve-se ir observando a evolução

destes indicadores ao longo do tempo e, por conseguinte, o desempenho pode ser comparado com o histórico, de forma contínua, ou então pode-se comparar o desempenho de diferentes partes da central, por exemplo, comparar o desempenho entre inversores. Através desta análise de perdas, se se verificar uma diminuição de desempenho, percebe-se que é necessário atuar na central FV. A título de exemplo, apresenta-se de seguida uma avaliação do PR, num longo período de tempo, fazendo comparações entre módulos saudáveis e módulos com pontos quentes [92].

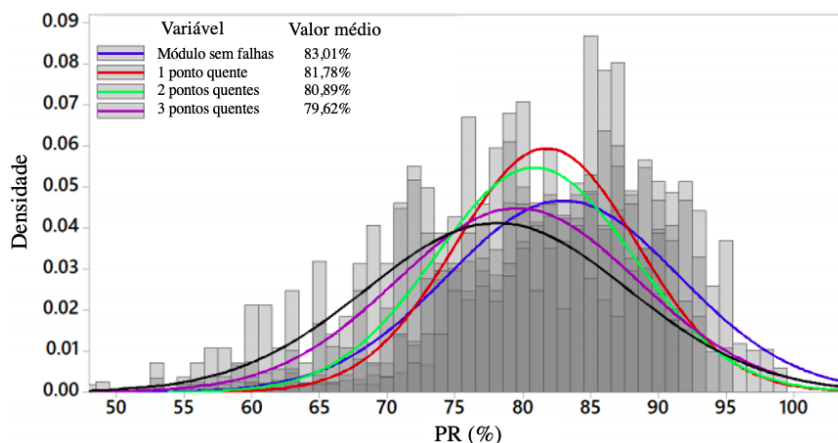


Figura 2.15: Histograma do PR anual e respetiva curva de distribuição normal, entre 2013 e 2017. Adaptado de [92]

A análise da curva característica corrente-tensão (I-V) é um dos métodos mais eficazes para identificar a degradação nos parâmetros básicos do módulo FV, como por exemplo, a variação da corrente de curto-circuito, a variação da tensão de circuito aberto e o ponto de potência máxima [77]. O procedimento passa por medir as características I-V do módulo e compará-las com as medições antes da sua implementação em campo [88]. A Figura 2.16 compara a curva I-V da folha de características com a curva I-V após quebra do módulo FV.

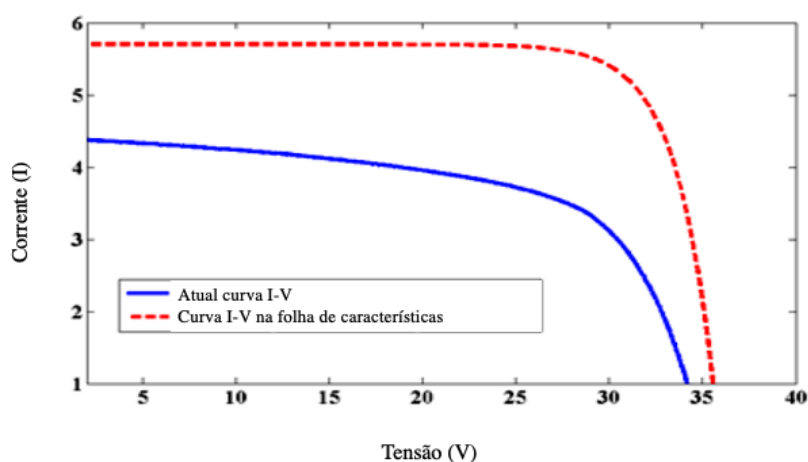


Figura 2.16: Comparação entre curvas I-V após quebra de um módulo FV [93]

Na tabela abaixo indicam-se alguns artigos publicados sobre a deteção de falhas recorrendo à caracterização elétrica. Pretende-se de forma resumida indicar consoante a técnica em análise, quais os parâmetros necessários e quais as falhas detetáveis com a sua aplicação.

Tabela 2.6: Revisão bibliográfica dos métodos de caracterização elétrica. Adaptado de [60]

Ano	Nome Técnica	Falhas detetadas	Parâmetros medidos
2015 [94]	Medição I-V	Falhas de curto-circuito e circuito-aberto	G, T_m , V_{str} , P_{str} , I_{str}
2019 [95]	Medição I-V	Falhas de sombreamento	G, T_m , parâmetros do módulo
2015 [96]	Medição I-V	Sombreamento parcial, falha de curto-circuito, falha no diodo de bypass e falhas de ligação	G, T_m , V_{str} , P_{str} , I_{str}
2014 [97]	Erro absoluto do PR	Sombreamento parcial, falhas nos módulos, falha na string, falha no inversor e MPPT	G, T_m , T_a , V_{str} , I_{str} , P_{str} , P_{ac}
2013 [98]	Análise de perdas	Diagnóstico de avarias no sistema FV ligado à rede	G, T_a , V_{str} , P_{str} , I_{str} , V_{ac} , P_{ac}

Na Tabela 2.6, G representa a irradiância, T_m a temperatura do módulo, T_a a temperatura ambiente, V_{str} a tensão da *string*, I_{str} a corrente da *string*, P_{str} a potência da *string*, V_{ac} a tensão do lado CA e P_{ac} a potência do lado CA.

2.3.4.2 Imagem de Eletroluminescência

Outra técnica comum para detetar falhas é a imagem de eletroluminescência (EL), cujo método consiste em colocar o módulo FV num ambiente escuro e submeter a uma tensão superior à tensão de circuito aberto nominal. Deste modo, vai circular uma corrente elétrica direta, de valor semelhante à corrente de curto-circuito nominal, e é então possível detetar uma radiação de baixa intensidade, emitida pelas células na gama do infravermelho [99]. A perda total da propriedade eletroluminescente indica que aquela zona não está a contribuir para o efeito fotovoltaico [100].

A Figura 2.17 compara os registos de um módulo FV numa inspeção visual com uma imagem de eletroluminescência do mesmo módulo. Com esta técnica é possível identificar defeitos que não são observáveis na inspeção visual. As células danificadas correspondem às zonas mais escuras da imagem EL.

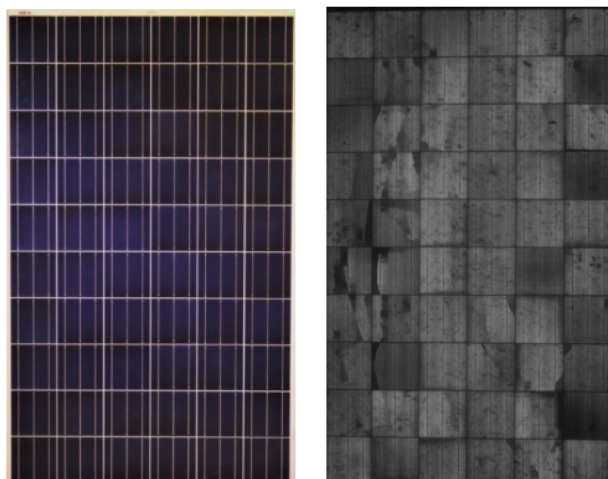


Figura 2.17: Módulo FV após inspeção visual (à esquerda) e imagem EL (à direita) [99]

2.3.4.3 Imagem de Infravermelhos

A imagem por infravermelhos, também chamada de imagem térmica, é uma técnica não destrutiva frequentemente utilizada para localizar falhas, principalmente aquelas que não são observáveis a olho nu [77].

O método recorre a uma produção de calor localizada que se deve ao efeito de aquecimento de Joule. A produção de calor é causada pelas células que estão a gerar menos corrente do que as outras células da série e atuam como resistências ou cargas, o que leva à dissipação de calor [77]. Esse calor dissipado gera um gradiente térmico que aparece como pontos brilhantes numa imagem térmica (Figura 2.18).

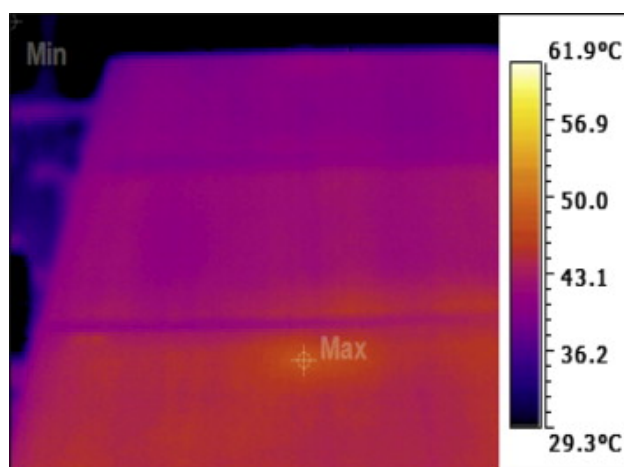


Figura 2.18: Ponto quente detetado através de imagem térmica [101]

2.3.4.4 Informação por ultrassons

Relativamente à informação por ultrassons, segundo [61], esta é uma técnica usada principalmente para identificar fissuras e estruturas de laminação separadas, antes da produção dos módulos FV. Além disso, também identifica células não operacionais num módulo e fissuras de degradação após o módulo ser colocado na central FV.

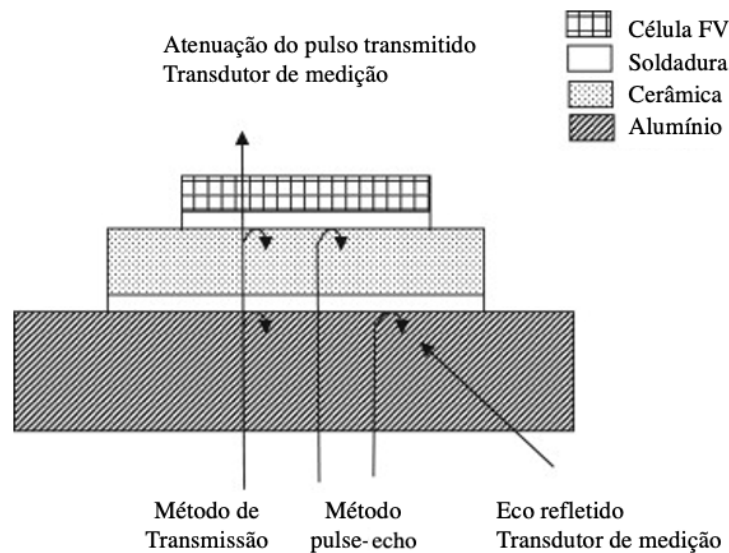


Figura 2.19: Inspeção com ultrassons [102]

A técnica ultrassônica é classificada em dois métodos de inspeção: método *pulse-echo* e método de transmissão, ver Figura 2.19. Em ambos os métodos, o módulo FV é digitalizado com o transdutor ultrassônico combinado com indicadores X-Y [77]. De acordo com [61], os dois métodos podem ser definidos da seguinte forma:

- O método de transmissão mede a atenuação do sinal ultrassônico que passa através da amostra testada e regista-se a informação da localização X-Y dos defeitos. Com este método obtém-se a localização dos defeitos e o seu tamanho;
- O método *pulse-echo* é o mais utilizado, nesta abordagem os impulsos ultrassônicos refletidos a partir dos defeitos são medidos, o que fornece o valor do eixo Z, para além da informação do tamanho do defeito e da sua localização X-Y. Este método identifica as causas de degradação do módulo e fornece dados técnicos que ajudam os fabricantes a melhorar a fiabilidade dos seus produtos.

2.3.4.5 Técnicas de *Machine Learning*

O desempenho de um módulo FV e a sua eficiência baseiam-se em várias condições, como a irradiação, a temperatura, a humidade, o sombreamento, o envelhecimento, entre outros. Consequentemente, torna-se difícil definir certos limites para a deteção de falhas [61]. As técnicas

de *Machine Learning* (ML) têm a capacidade de aprender e modificar automaticamente certas condições a partir de um determinado conjunto de dados [103].

Os algoritmos de aprendizagem são treinados com dados experimentais ou modelos previstos, para aprenderem a relação entre os parâmetros de entrada e saída do sistema FV [104]. Além dos dados normais, são também necessários dados anômalos, para uma formação e previsão precisas, devido à ocorrência de falhas [61].

De acordo com [61], as técnicas de ML apresentam tipicamente as seguintes desvantagens:

- Dificuldade na recolha de dados;
- A precisão depende da qualidade dos dados de treino;
- Os dados de treino não estão disponíveis globalmente, uma vez que variam de acordo com o tipo, tamanho e localização da central FV.

O artigo [60] realiza uma revisão bibliográfica das técnicas de *Machine Learning* desenvolvidas em diversos estudos publicados. A Tabela 2.7 apresenta alguns desses estudos e pretende, de forma sucinta, indicar os parâmetros e as falhas detetadas consoante a técnica aplicada.

Tabela 2.7: Revisão bibliográfica dos métodos de ML. Adaptado de [60]

Ano	Nome Técnica	Falhas detetadas	Parâmetros medidos
2018 [105]	Fuzzy-Logic	Sombreamento parcial, falhas nas células	I_g , T_a , T_m , V_{array} , I_{array} , P_{array} , P_{ac}
2015 [106]	Redes Neurais Artificiais	Falhas no módulo	Parâmetros do módulo
2016 [107]	Redes Neurais Artificiais	Sombreamento parcial, falhas de curto-circuito e circuito aberto, falhas nos díodos de bypass	G , T_m , V_{array} , I_{array} , P_{array}
2011 [108]	Redes Neurais Artificiais	Falhas de curto-circuito	G , T_m , V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp}
2018 [109]	Redes Neurais Artificiais e Fuzzy Logic	Sombreamento parcial, falhas nos módulos, falhas no MPPT	G , T_m , V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp}
2012 [110]	Árvore de Decisão	Sombreamento parcial, circuito aberto e falhas entre linhas	G , T_m , V_{array} , I_{array} , P_{array}

Na Tabela 2.7, G representa a irradiância, T_m a temperatura do módulo, T_a a temperatura ambiente, V_{array} a tensão do *array*, I_{array} a corrente do *array*, P_{array} a potência do *array*, V_{mpp} a tensão do MPPT, I_{mpp} a corrente do MPPT, P_{mpp} a potência do MPPT e P_{ac} a potência do lado CA.

Segundo [91], as Redes Neurais Artificiais (RNA) foram das técnicas de ML que mais atraíram o interesse da investigação, durante a última década. As RNA tem várias vantagens, como uma excelente aproximação para funções não lineares, uma tomada de decisão rápida, não

possuem restrições quanto à normalização ou independência dos dados da entrada [111]. Por conseguinte, as RNA têm sido amplamente exploradas no domínio do fotovoltaico [91].

As RNA podem ser do tipo *Shallow Neural Network* (SNN) ou *Deep Neural Network* (DNN). As DNN diferem principalmente das SNN na profundidade do modelo e no tipo de dados de entrada. Para as características da entrada, em vez de 1 Dimensão (1D) (por exemplo, medidas elétricas ou ambientais), as DNN processam a 2 Dimensões (2D), o que inclui, por exemplo, imagens do sistema FV e gráficos gerados, Figura 2.20 e 2.21, respetivamente. [91]

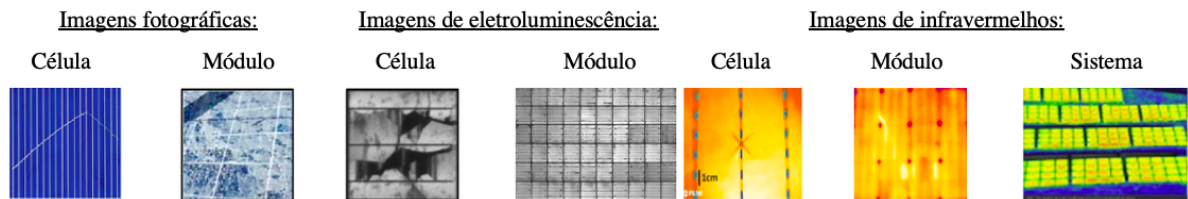


Figura 2.20: Exemplos de imagens utilizadas como dados de entrada para DNN [91]

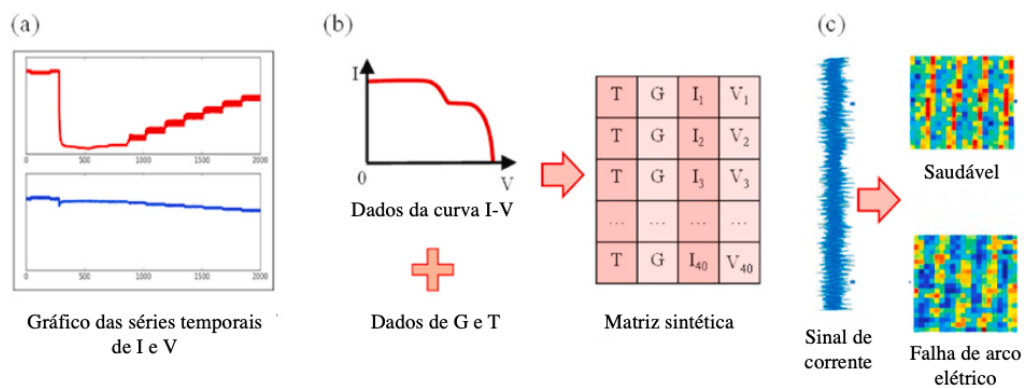


Figura 2.21: Exemplos de gráficos utilizados como dados de entrada para DNN [91]

De acordo com [91], praticamente todas as falhas permanentemente visíveis (descoloração, delaminação, fissuras, etc) são detetadas recorrendo a modelos DNN. Os modelos SNN são tipicamente usados para detetar falhas elétricas ou sombreamentos. É ainda de destacar o aumento do interesse pelas Redes Convolucionais (tipo DNN), cujas aplicações têm crescido a um ritmo acentuado.

Capítulo 3

Caracterização da Central e Análise de Dados

Neste capítulo, caracteriza-se a central FV em estudo e realiza-se uma análise aos dados de produção da mesma. Pretende-se identificar medições anómalas e caracterizar diversos padrões temporais de produção.

3.1 Caracterização da Central

A central FV em análise situa-se em Morgado de Apra, no concelho de Loulé, com uma potência nominal de 4 MW. Na Figura 3.1, apresenta-se uma imagem via satélite da central FV.



Figura 3.1: Imagem satélite da central fotovoltaica em estudo

Trata-se de um central fixa, ou seja, sem qualquer tipo de sistema de seguimento. Os módulos FV encontram-se orientados a Sul com uma inclinação de 30° e possuem as seguintes características:

- Fabricante: *Hanwha Q. cells*;
- Tipo de módulo: policristalino;
- Modelo: SF220-30-1P245L;
- Potência unitária: 245 Wp.

Relativamente aos inversores, existem 4 inversores do tipo central, os quais possuem as seguintes características:

- Fabricante: *Siemens*;
- Modelo: *Sinvert 1000 MS TL*;
- Potência unitária: 1000 kVA.



Figura 3.2: Componentes da central: módulo (à esquerda) e inversor (à direita)

O modelo do inversor utilizado é do tipo sem transformador (na terminologia inglesa, *Transformerless* (TL)) e possui uma ligação interna Mestre/Escravo (na terminologia inglesa, *Master/Slave* (MS)). Segundo [112], para centrais FV na gama dos MW é comum usar-se um conjunto de unidades inversoras na gama dos kW que funcionam internamente em modo Mestre/Escravo. Porém, a especificação MS no modelo do inversor é apenas informativa e não tem qualquer influência no comportamento da simulação. Na figura 3.3, apresenta-se o esquema unifilar do inversor utilizado na central FV em estudo, o qual é composto por duas unidades inversoras.

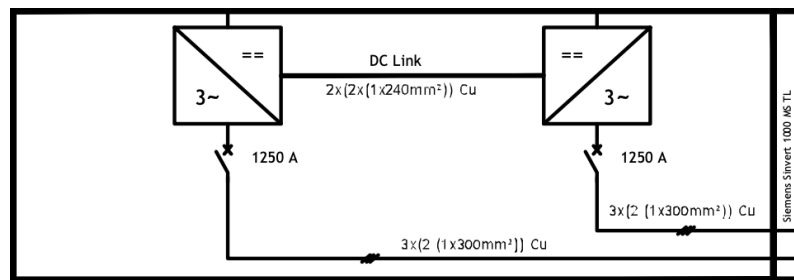


Figura 3.3: Esquema unifilar do inversor em estudo

Relativamente à disposição da central, cada *string* é composta por 22 módulos fotovoltaicos, o que equivale a uma potência por *string* de 5390 Wp. A cada inversor central ligam-se 210 *strings*, corresponde a 4620 módulos por inversor. Na figura abaixo, apresenta-se uma parte do esquema unifilar da central em estudo, indicando as ligações de um dos inversores centrais.

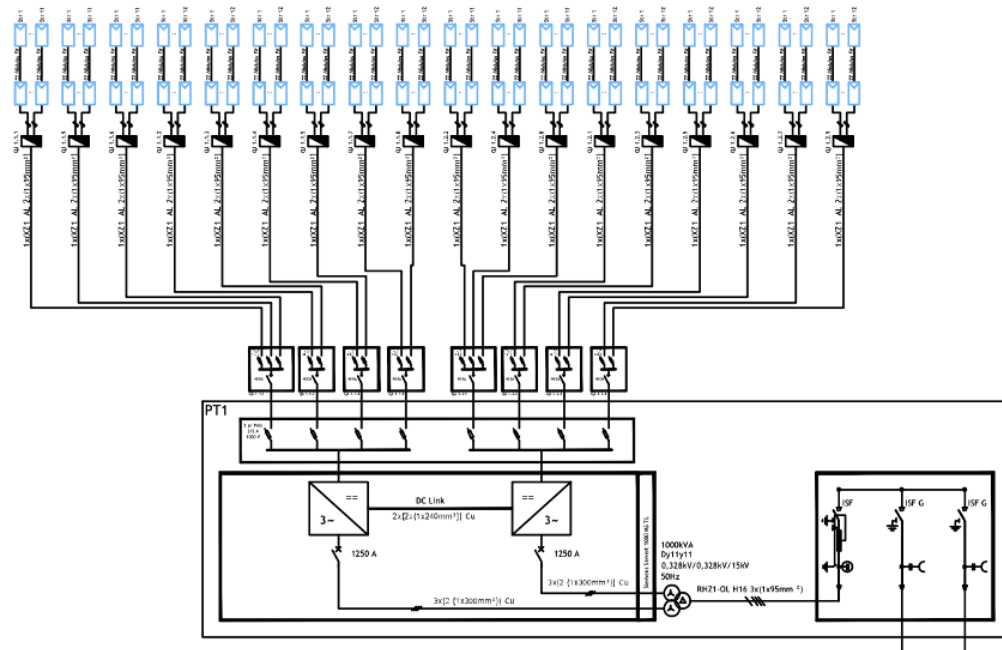


Figura 3.4: Parte do esquema unifilar da central

Como se pode observar na figura anterior, cada inversor *Sinvert 1000 MS TL* possui 8 entradas no lado de corrente contínua.

3.2 Análise de Dados

Os dados fornecidos correspondem às medições desde 1/1/2019 a 31/12/2019, em intervalos de 5 minutos, das seguintes variáveis:

- Irradiância medida no plano do módulo, em kW/m^2 ;

- Potência do lado de Corrente Alternada, em kW, para cada unidade inversora. Dado que existem 4 inversores centrais, são 8 as unidades inversores existentes;
- Temperatura ambiente, em °C.

Numa primeira abordagem, antes de avançar para modelos matemáticos, optou-se por uma interpretação gráfica das variáveis, para entender como estas variam e como se comportam. Nos próximos gráficos, apresentam-se as evoluções das variáveis existentes ao longo de um dia de Janeiro.

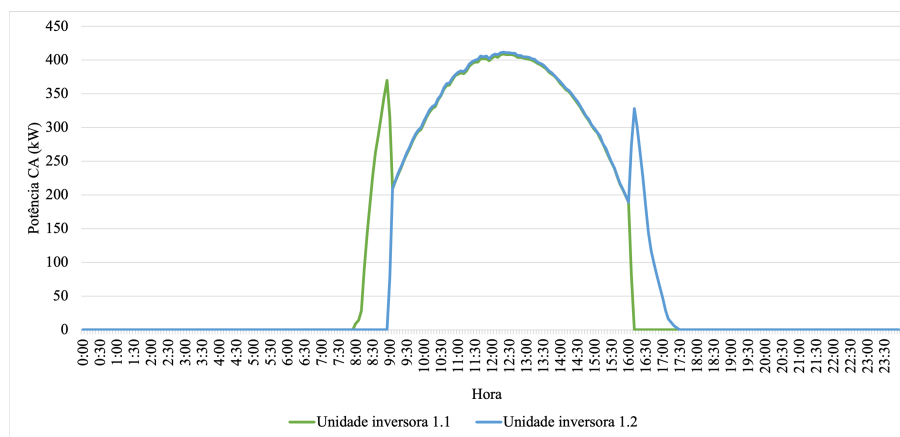


Figura 3.5: Evolução da potência CA nas duas unidades do inversor 1

A Figura 3.5 apresenta a evolução das duas unidades inversoras e é possível perceber que uma delas arranca primeiro e, a partir de um certo valor de potência, a outra unidade também entra em funcionamento. Após analisar vários dias, foi possível entender que a atribuição da unidade que arranca é aleatória, não seguindo nenhum padrão. Durante a análise foi possível descobrir um problema no arranque de uma das unidades do inversor 3, como se irá ilustrar de seguida:

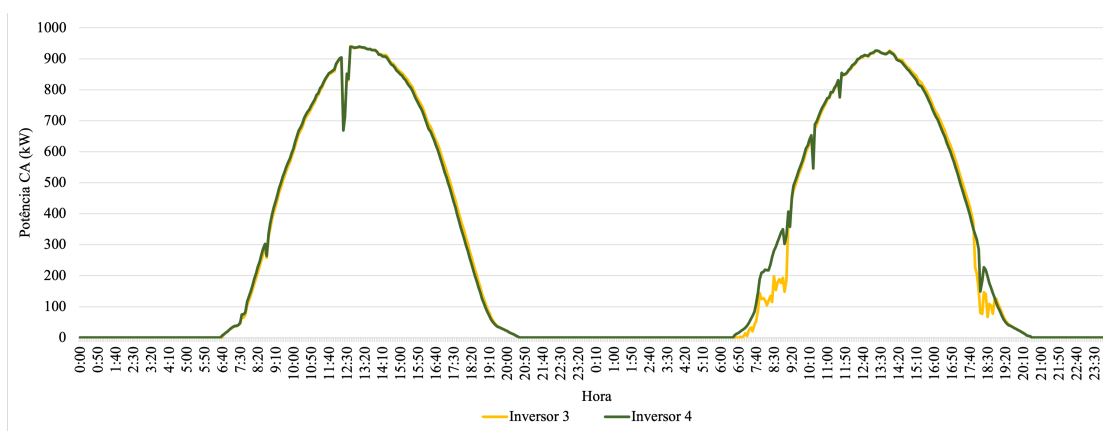


Figura 3.6: Comparação da potência CA nos inversores 3 e 4

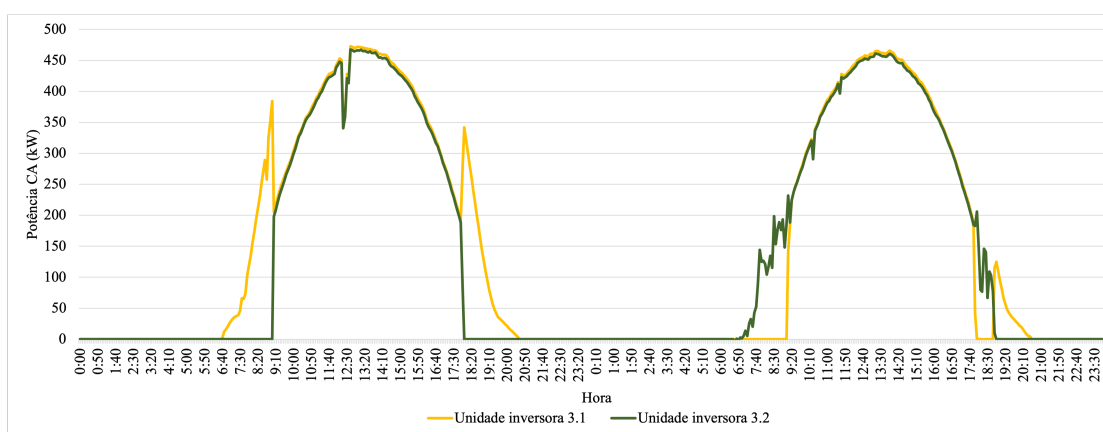


Figura 3.7: Comportamento das unidades inversoras do inversor 3

Na Figura 3.6, observa-se que ao 2º dia o inversor 3 demora mais tempo a arrancar, relativamente ao inversor 4. Deste modo, existe interesse em analisar individualmente as unidades inversoras do inversor 3, ilustradas na Figura 3.7. É possível concluir que quando é a unidade 3.2 a arrancar (2º dia) existe uma falha no arranque, o mesmo não acontece quando é a unidade 3.1 a começar (1º dia).

Embora seja interessante em algumas situações avaliar o comportamento das unidades inversoras individualmente, para a análise que vai ser realizada é mais útil avaliar as produções das duas unidades em conjunto. Por exemplo, para avaliar o desempenho da central é útil comparar os desempenhos dos 4 inversores existentes. Deste modo, a Figura 3.8 ilustra a evolução da potência no inversor 1, obtida através da soma das produções de cada uma das suas unidades inversoras.

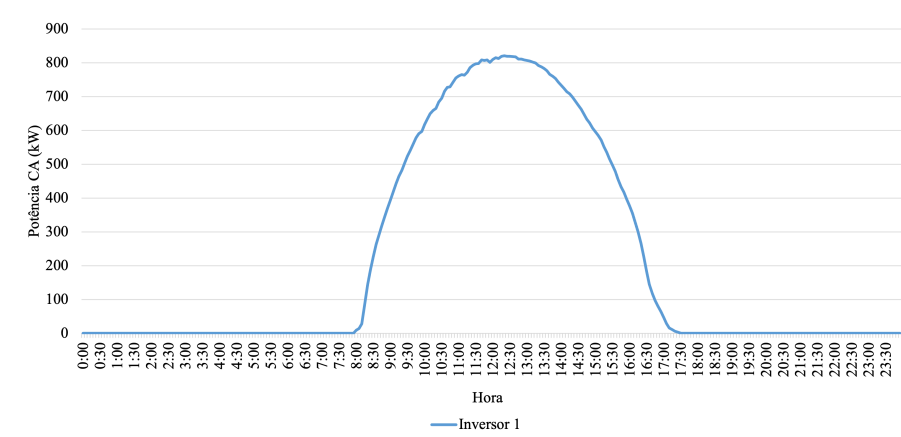


Figura 3.8: Evolução da potência CA no inversor 1

Para terminar a apresentação das variáveis, ilustra-se de seguida a evolução das duas variáveis meteorológicas medidas: a irradiância e a temperatura ambiente. De notar que a irradiância é medida no plano do módulo, ou seja, a 30º.

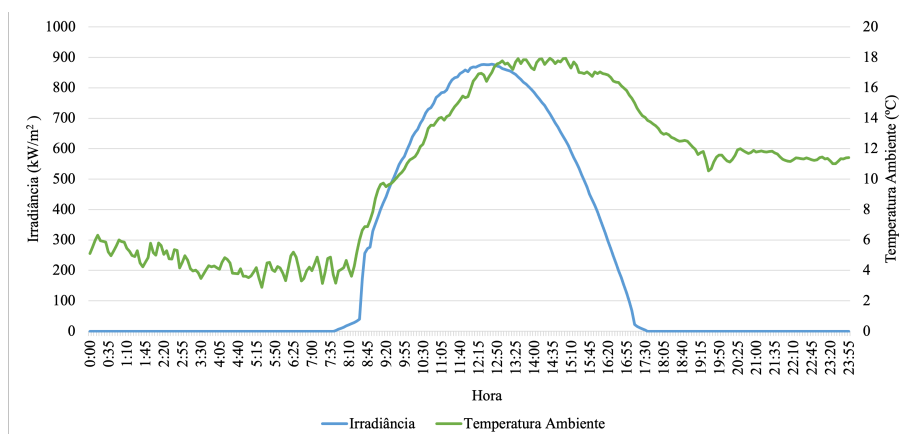


Figura 3.9: Evolução das variáveis meteorológicas medidas

Após analisar o comportamento das variáveis ao longo de um dia, é necessário entender que como o sol é um recurso intermitente, as variáveis apresentam oscilações e nem sempre seguem um padrão. A maior intermitência observa-se devido à presença de nuvens. Na Figura 3.8, observa-se o comportamento do inversor 1 num dia claro, porém existem outras situações:

- Nuvens contínuas, como ilustrado na Figura 3.10;
- Nuvens intermitentes, como ilustrado na Figura 3.11.

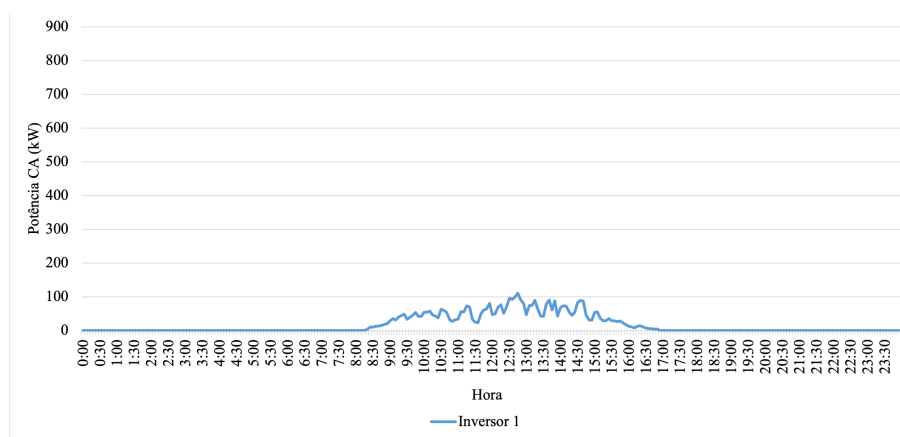


Figura 3.10: Evolução da potência CA num dia de nuvens contínuas

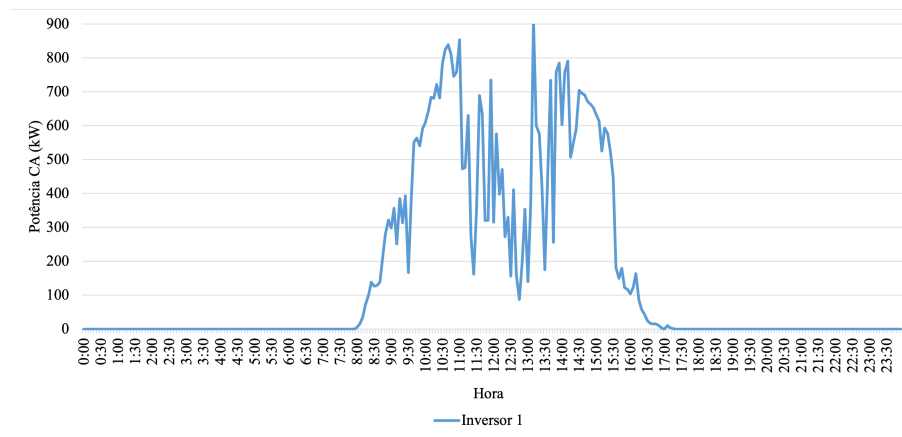


Figura 3.11: Evolução da potência CA num dia de nuvens intermitentes

Num dia de nuvens contínuas ou compactas a produção da central FV assume valores baixos sistematicamente. Já num dia de nuvens intermitentes, observam-se oscilações nos valores de potência devido à passagem de nuvens.

Após conhecer os perfis típicos dos dias, podem-se estabelecer comparações entre as potências dos diferentes inversores para entender se estão a funcionar como esperado ou não. Caso se observe que algum inversor está com um desempenho inferior aos outros, deve-se ficar alerta pois pode ter ocorrido uma anomalia nesse inversor. Por exemplo, na Figura 3.12, observa-se que o Inversor 4, a partir das 11:00h, fica com uma potência constantemente inferior à dos restantes inversores, o que pode significar uma avaria nesse mesmo inversor.

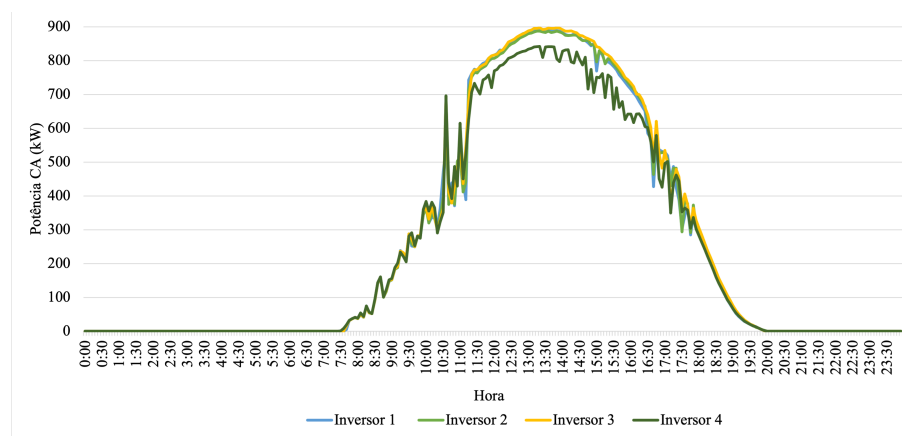


Figura 3.12: Comparação da potência CA nos 4 inversores

Uma anomalia numa central FV pode demorar a ser detetada devido à grande dimensão do sistema, por exemplo, na figura seguinte observa-se que o Inversor 2 teve um desempenho inferior aos restantes inversores, pelo menos, durante dois dias, o que é indesejável para o bom desempenho da central.

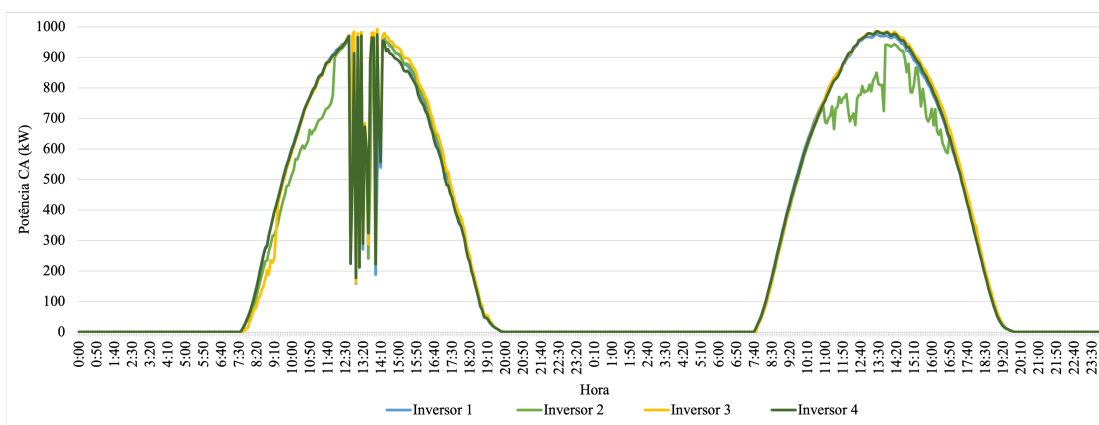


Figura 3.13: Comparação da potência CA nos 4 inversores durante dois dias

Posteriormente à análise de dados ao nível dos inversores e às variáveis meteorológicas, recebeu-se um segundo conjunto de dados com mais informações: as produções das *strings*, em Wh, em intervalos de 5 minutos, no ano de 2019. As produções das *strings* vêm agrupadas por quadros de junção, os quais seguem a seguinte nomenclatura "Q X.Y.Z", onde Q é a abreviatura para quadro de junção, X é o número do inversor (X=1,2,3,4), Y é o número da unidade inversora (Y=1,2) e, por último, Z é o número da série (Z=1,2,3,4,5,6,7,8). Assim, "Q 1.2.7" representa o sétimo quadro de junção da segunda unidade inversora do inversor 1.

A título de exemplo, apresentam-se de seguida as produções, ao longo de um dia, do conjunto de *strings* do quadro de junção 1 do inversor 1 (Q 1.1.1).

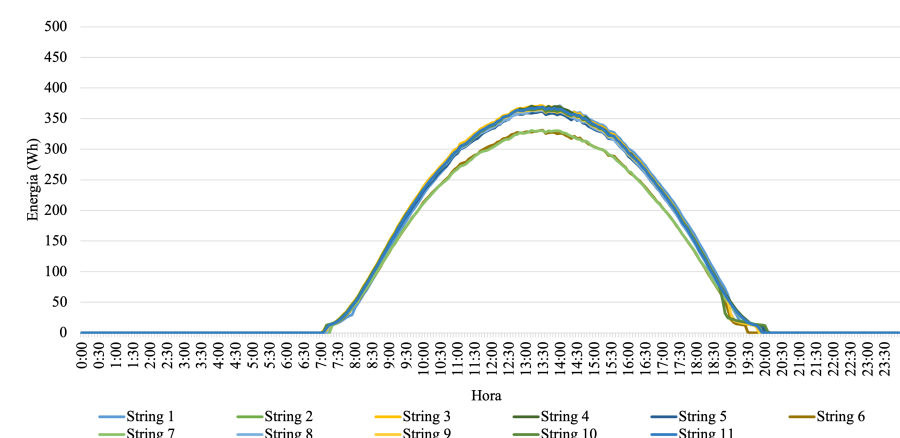


Figura 3.14: Comparação da energia produzida pelas diferentes *strings* de um quadro de junção

Através da análise da Figura 3.14, é possível observar *strings* com um desempenho inferior às restantes, neste caso, em específico, tratam-se das *strings* 6 e 7. Por meio desta análise comparativa de *strings*, conseguem-se detetar e isolar vários problemas do sistema FV. Este tipo de abordagem será muito importante para avaliar o desempenho da central FV.

3.3 Organização dos Dados

Para a presente dissertação, optou-se por um tratamento hierárquico dos dados, como ilustrado na Figura 3.15, existem três níveis de informação: nos inversores, nos quadros de junção e ainda nas *strings*. O tratamento de dados tanto pode acontecer do nível mais geral, os inversores, para o mais detalhado, as *strings*, ou no sentido contrário.

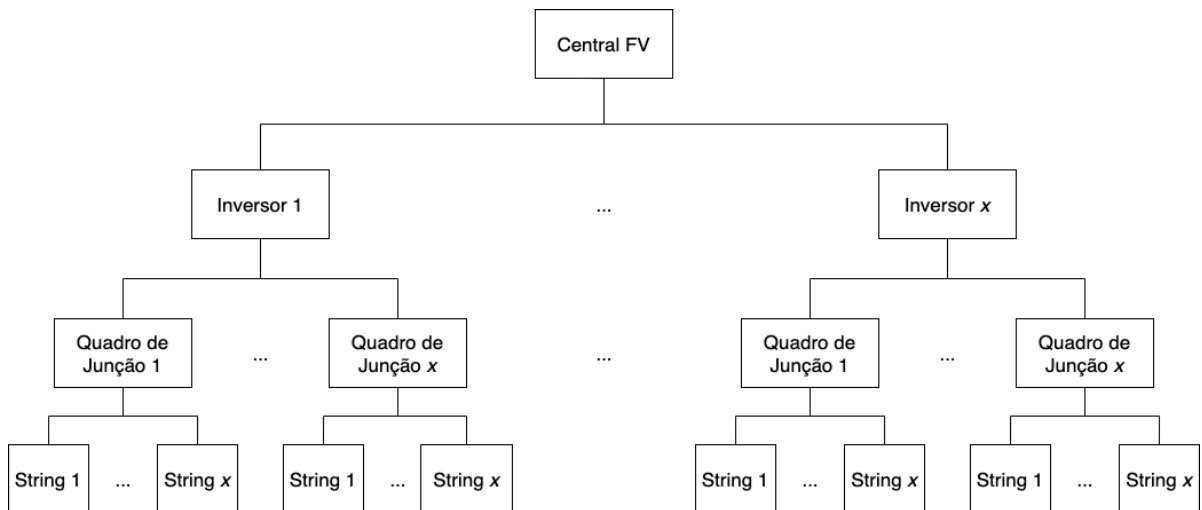


Figura 3.15: Esquema ilustrativo do tratamento hierárquico

O esquema da Figura 3.15 representa de forma genérica os elementos de uma central FV. Como já foi referido, para o caso de estudo desta dissertação, a central possui 4 inversores, sendo que cada inversor possui 18 quadros de junção (9 em cada unidade inversora) e, no último nível, cada quadro de junção possui entre 11 a 12 *strings*, variando de quadro para quadro.

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo, é apresentada a metodologia implementada no âmbito da presente dissertação. Com recurso a fluxogramas e esquemas serão explicados os algoritmos desenvolvidos, mencionando ainda os seus pressupostos e objetivos.

4.1 Aspetos Gerais

A avaliação de desempenho da central FV vai corresponder à análise do desvio da produção real relativamente a um valor de produção de referência. Quanto ao valor de referência, sabe-se que este pode ser obtido de diversas maneiras, tais como:

- Através de dados reais medidos, porém esta abordagem só é possível caso existam vários registos históricos detalhados, como por exemplo, se as produções de todas as *strings* de uma central FV forem acessíveis. Caso se siga esta abordagem, mas existam poucos dados, pode resultar numa aproximação fraca;
- Através de estimativas de produção, em função das variáveis meteorológicas medidas na central. Se não existirem dados reais medidos, tem que se seguir esta abordagem obrigatoriamente.

Relativamente ao segundo ponto, a estimativa de produção pode ser efetuada de diversas maneiras e com diferentes níveis de informação. Por exemplo, numa abordagem mais simples, a produção pode ser estimada através de uma proporção de irradiâncias (como já foi referido no Capítulo 2, Secção 2.2.2).

A ferramenta desenvolvida seguiu sempre o mesmo princípio: medir o desvio do valor real relativamente a um valor de referência. Como para o caso de estudo em questão existiam várias medições ao nível das *strings* e dos inversores, optou-se por um valor de referência calculado através dos valores reais medidos.

Recorreu-se a uma análise de duas janelas temporais: janela diária e janela semanal. Foi através de médias móveis sob os desvios registados que se aplicaram estas janelas temporais. A janela diária destina-se a detetar, essencialmente, falhas de curta duração, já a janela semanal terá especial utilidade para sinalizar falhas sistemáticas/longa duração.

De modo a avaliar os desvios de produção relativamente aos valores de referência, sentiu-se a necessidade de criar uma metodologia em que se dividia o dia em diferentes momentos, uma vez que, ao longo do dia, existem características específicas da operação da central. Assim, torna-se mais fácil isolar e compreender algumas falhas detetadas, consoante o momento do dia. A abordagem de repartir o dia também foi seguida por uma questão de escalas dos desvios, uma vez que os desvios ao início da manhã e ao final da tarde são tipicamente inferiores aos registados durante o resto do dia. Posto isto, optou-se por calcular os indicadores para quatro momentos do dia: o início da manhã, o final da manhã, o início da tarde e, por último, o final da tarde.

Dado que seria complicado analisar os desvios registados, devido a problemas de escala, optou-se por desenvolver uma metodologia com base na análise de quantis. Deste modo, ao trabalhar com quantis, consegue-se definir uma escala de forma probabilística que é geral a todos os indicadores e pode ser aplicada a outras centrais.

4.2 Descrição da Ferramenta

O objetivo da presente dissertação passa por desenvolver uma ferramenta de análise de informação, capaz de avaliar os desvios de desempenho. Como tal, apresenta-se no fluxograma da Figura 4.1 o procedimento seguido para o cálculo dos indicadores de desempenho, baseados nos dados reais medidos.

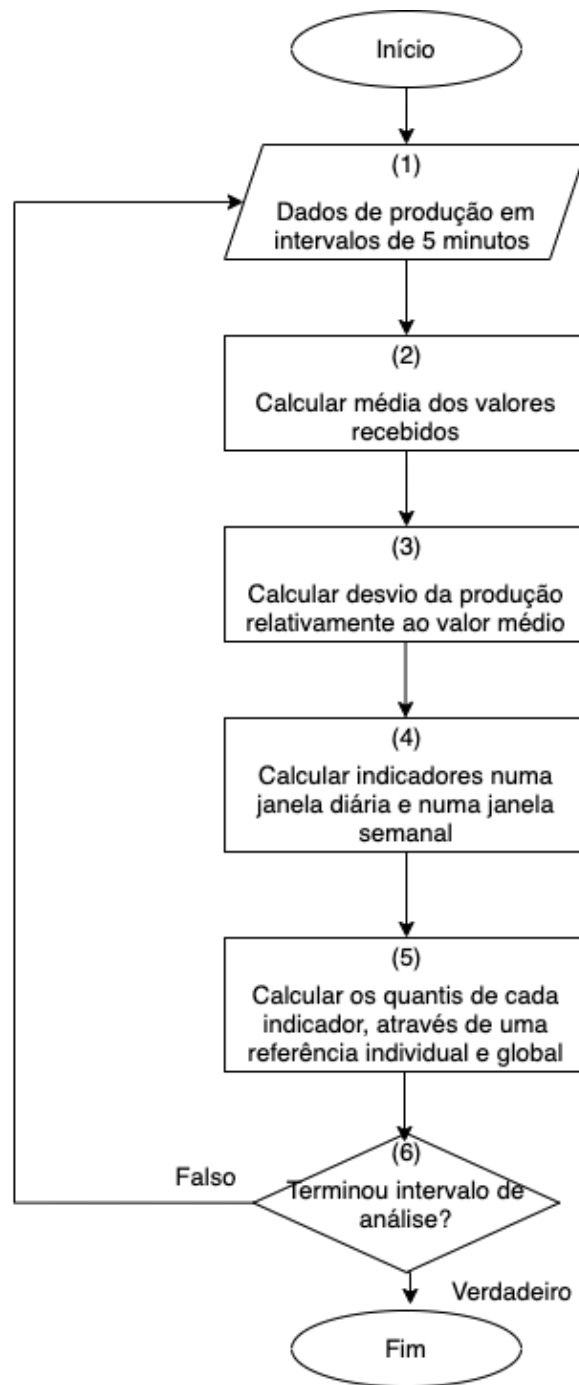


Figura 4.1: Fluxograma para o cálculo dos indicadores de desempenho

O procedimento desenvolvido pode ser aplicado numa análise de inversores, análise de quadros de junção ou ainda numa análise de *strings*. Consoante o tipo de análise, as variáveis i e n assumem valores diferentes. Pode ser aplicado, por exemplo, numa análise comparativa de *strings* do mesmo quadro de junção e, para essa situação, a variável n corresponde ao número de *strings* e i corresponde ao número da *string* em questão.

De modo a apresentar detalhadamente a metodologia implementada, as próximas secções contêm as explicações para cada passo do fluxograma, salvo para o ponto de partida e final do procedimento.

4.2.1 Passo 1- Leitura das Produções

Para se iniciar o processo de cálculo dos indicadores, é necessário receber os dados de produção. Como já foi referido no Capítulo 3, as medições chegam em intervalos de 5 minutos e existem registos ao nível dos inversores, do lado CA, em kW, e ao nível das *strings*, em Wh.

4.2.2 Passo 2- Cálculo do Valor Médio das Produções

Após a leitura dos dados, é realizado o cálculo do valor médio das produções recebidas:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n Prod_i}{n} \quad (4.1)$$

Onde \bar{x} representa o valor médio das produções, n pode ser o número de inversores, número de quadros de junção ou número de *strings*, dependendo da análise que está a ser feita. $Prod_i$ corresponde à produção do elemento i .

4.2.3 Passo 3- Cálculo dos Desvios de Produção

Depois de conhecido o valor médio naquele intervalo de 5 minutos, segue-se para o cálculo dos desvios de produção que correspondem à diferença entre o valor médio e a produção real, isto é:

$$D_i = \bar{x} - Prod_i \quad (4.2)$$

Assim, vem que:

- Desvios de produção negativos correspondem a valores de produção acima da média das produções, indicando um bom desempenho do elemento i ;
- Desvios de produção nulos correspondem a valores de produção iguais à média das produções;
- Desvios de produção positivos correspondem a valores de produção abaixo da média das produções, indicado um desempenho mais fraco do elemento i relativamente aos seus pares.

4.2.4 Passo 4- Cálculo dos Indicadores Diários e Semanais

O cálculo dos indicadores de desempenho foi realizado em duas janelas temporais diferentes: janela diária (1 dia) e janela semanal (7 dias), sendo que a primeira tem como objetivo detetar falhas temporárias e a segunda para detetar falhas sistemáticas. Para os cálculos destes indicadores, recorre-se a médias móveis sob os desvios calculados (D_i).

O esquema da Figura 4.2 representa a organização dos indicadores desenvolvidos.

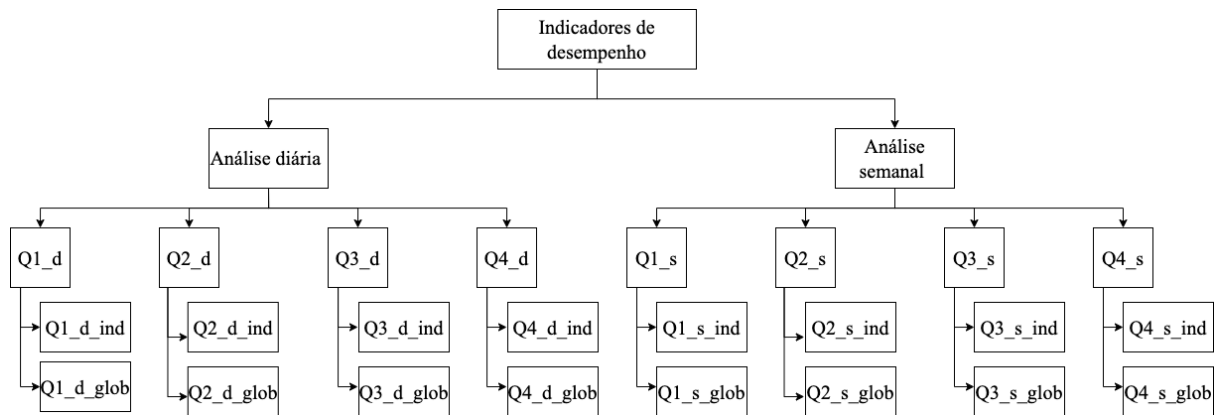


Figura 4.2: Organização dos diferentes indicadores de desempenho

Observa-se que para cada uma das análises temporais surgem quatro indicadores: Q1, Q2, Q3 e Q4, os quais são calculados para determinados momentos do dia: início da manhã, fim da manhã, início da tarde e fim da tarde, respetivamente. A atribuição dos momentos teve em conta os seguintes critérios:

- Início da manhã (Q1) corresponde ao período de arranque da central até ao ponto em que atinge o nível de produção de 50% relativamente ao valor máximo num dia claro, no mês de análise;
- Fim da manhã (Q2) diz respeito ao período de produção entre os 50% e os 100% do valor máximo num dia claro, também designado por pico de produção;
- Início da tarde (Q3) corresponde ao intervalo entre o máximo do dia e nível de produção de 50% relativamente ao máximo;
- Fim da tarde (Q4) refere-se ao baixar da produção entre os 50% relativamente ao valor máximo e o terminar de produção.

Deste modo, torna-se mais fácil isolar e compreender algumas falhas detetadas, por exemplo, se existir um problema no arranque do inversor, o mesmo será detetado no indicador Q1 e não afetará as restantes horas do dia nem os restantes indicadores.

Apresenta-se de seguida, a título de exemplo, um gráfico explicativo desta atribuição dos quatro momentos para o mês de Julho, no ano de 2019.

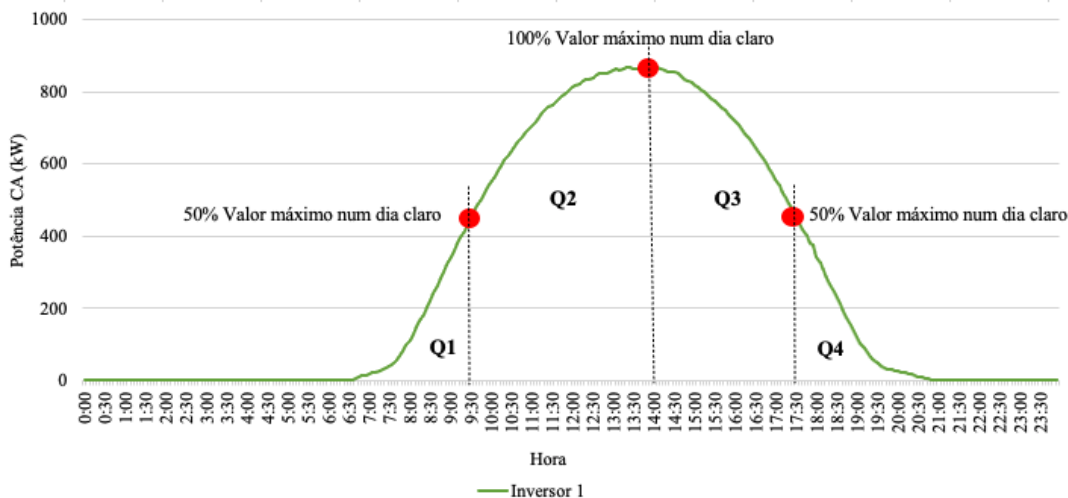


Figura 4.3: Indicadores de desempenho para os diferentes momentos do dia

4.2.5 Passo 5- Cálculo dos Quantis de Cada Indicador

Na Figura 4.2, observou-se que de cada indicador Q1, Q2, Q3 e Q4 surgiam dois indicadores: um individual e um global. A referência individual resulta do registo histórico do próprio equipamento, já a referência global resulta do registo histórico dos equipamentos semelhantes.

Os valores que os indicadores individuais e os indicadores globais assumem indicam os quantis onde os mesmos se encontram, recorrendo a uma função de distribuição normal cumulativa que possui os seguintes parâmetros:

$$q = \text{Distribuição.Normal}(\text{Indicador}; \text{Média}; \text{Desvio-Padrão})$$

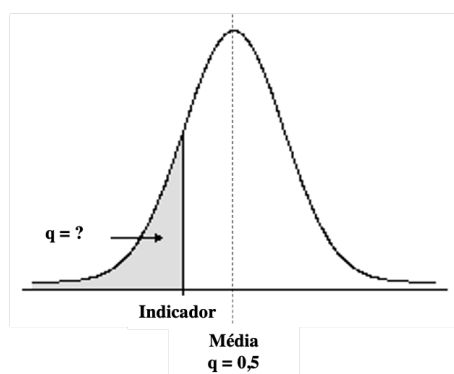


Figura 4.4: Distribuição normal para a identificação do quantil

Para a média e desvio-padrão anual, a função devolve o quantil em que se encontra o indicador, ou seja, é apresentado um valor entre 0 e 1. Como se pode ver pela Figura 4.4, um quantil de 0,5 representa um indicador que está no seu valor médio. Produções acima da média encontram-se

em quantis inferiores a 0,5, já as produções abaixo da média encontram-se em quantis superiores a 0,5. Assim, quanto maior o quantil mais o elemento se afasta da média, indicando assim um desempenho mais fraco que o esperado.

4.2.6 Passo 6- Critério de Paragem

Pode existir um critério de paragem, caso se especifique o tempo desejado de análise. Para uma situação de monitorização contínua, não se termina o ciclo, ou seja, continuam-se a receber dados a cada 5 minutos.

4.3 Exemplo da Aplicação da Metodologia

De forma a suportar a explicação até agora realizada, apresenta-se de seguida um exemplo da aplicação da metodologia desenvolvida no inversor 1, no mês de Julho de 2019. Inicialmente, são calculadas as médias de produção a cada 5 minutos e depois averiguam-se os desvios relativamente a essas médias. Na Figura 4.5, apresentam-se os desvios do Inversor 1, no mês de Julho.

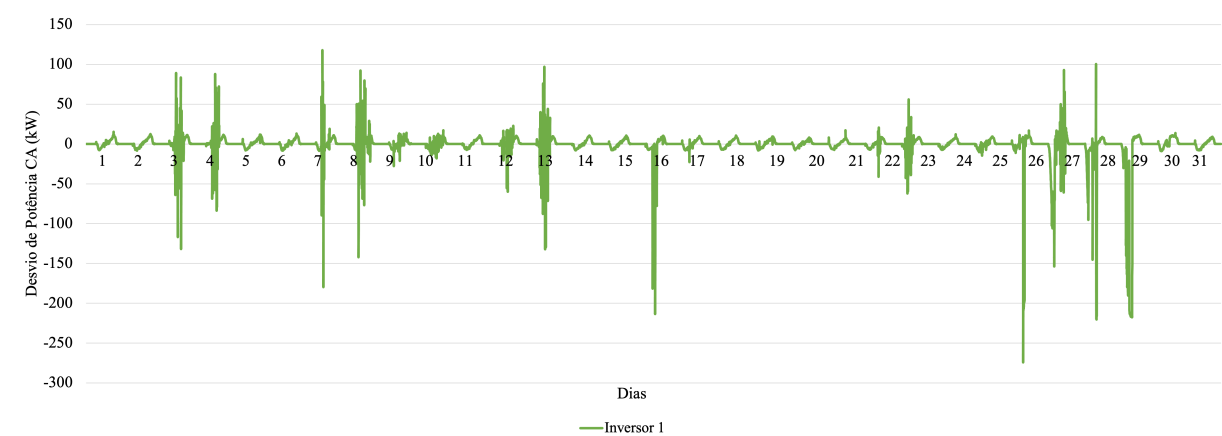


Figura 4.5: Representação dos desvios de produção no mês de Julho

Observam-se alguns desvios de maior magnitude esporadicamente, porém, ao analisar apenas os desvios do inversor 1, não se podem retirar conclusões acerca do seu desempenho. Pode-se estar perante dias bastante nublados e essa ser a razão dos desvios registados e não se tratar de nenhuma falha no equipamento.

Conhecidos os desvios de produção, reúnem-se as condições necessárias para o cálculo dos indicadores, os quais resultam de médias móveis sob os desvios. De forma esquemática, apresentam-se na Figura 4.6 os indicadores de desempenho existentes para a análise do inversor 1. Onde a verde se encontram os quatro indicadores diários (Q1_d, Q2_d, Q3_d e Q4_d), a amarelo os quatro indicadores semanais (Q1_s, Q2_s, Q3_s e Q4_s), depois existe a divisão de cada um destes

indicadores no seu respetivo indicador individual e global a laranja e azul. Através desta abordagem, cada elemento possui, então, 16 indicadores de desempenho, como se pode comprovar no esquema da Figura 4.6.

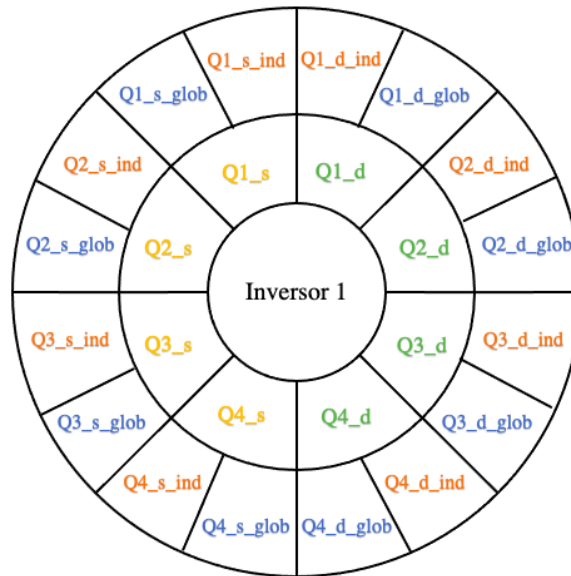


Figura 4.6: Indicadores de desempenho para o inversor 1

De forma a compreender como variam os indicadores desenvolvidos, ilustra-se de seguida a evolução do indicador Q1_d, no mês de Julho, nos inversores 1 e 2. Optou-se por acrescentar o indicador do inversor 2 de modo a se obter um ponto de comparação.

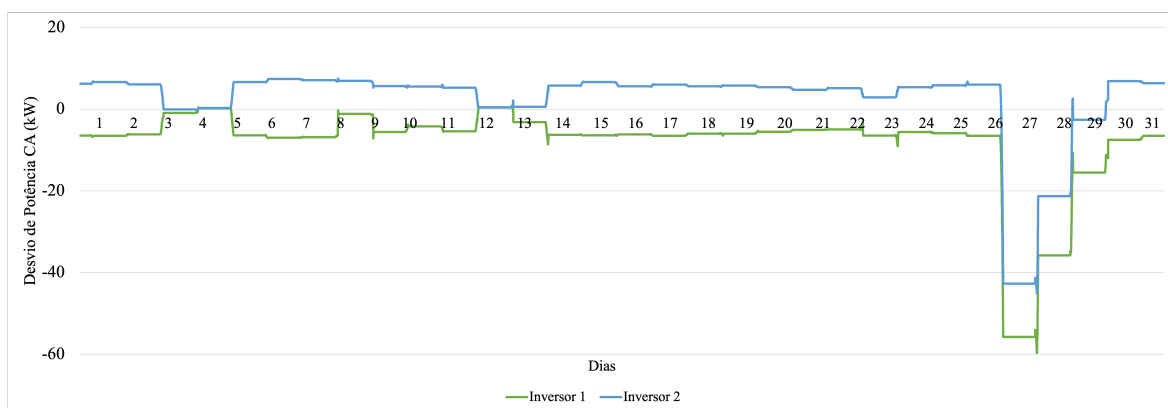


Figura 4.7: Indicador de desempenho Q1_d para o inversor 1 e 2 no mês de Julho

Através da Figura 4.7 compreende-se que o inversor 1 teve sempre um melhor desempenho relativamente ao inversor 2, ou seja, em termos gráficos, a linha do inversor 1 andou sempre abaixo da linha do inversor 2. De notar que, nos dias 27 e 28 de Julho, os inversores 1 e 2 estão bastante acima da média de produção do início do dia, o que pode ser justificado pela ocorrência de uma

falha num dos outros inversores. Após consultar as produções dos inversores 3 e 4 foi possível observar uma falha no inversor 4 neste período, a qual será analisada no Capítulo 5, Secção 5.2.2.2.

Para ilustrar a diferença entre as duas janelas temporais, a Figura 4.8 apresenta o mesmo indicador Q1 para os dois inversores, mas numa janela semanal.

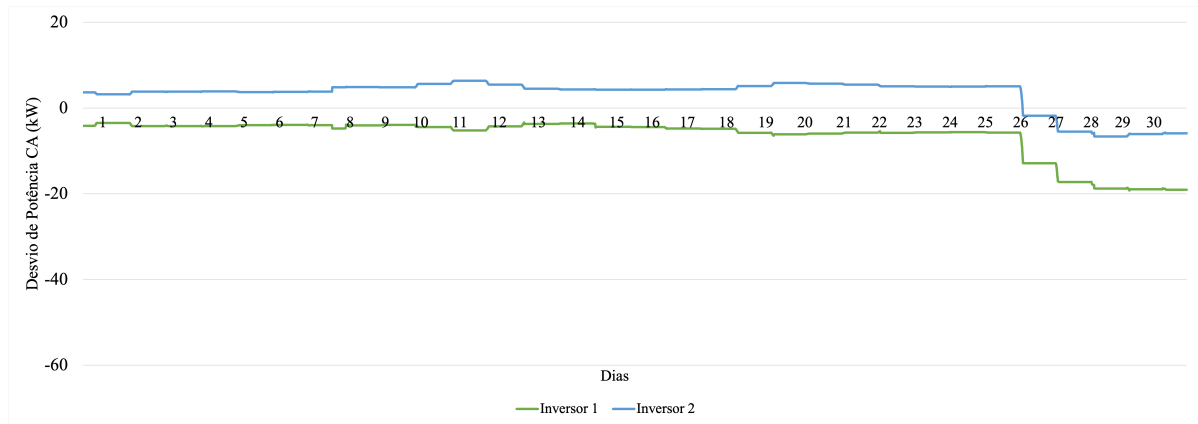


Figura 4.8: Indicador de desempenho Q1_s para o inversor 1 e 2 no mês de Julho

Pode-se concluir que, como esperado, a janela semanal apresenta menos variações, pelo que desvios de pequena magnitude acabam por ser diluídos no resto dos dados e tornam-se insignificantes.

O passo seguinte consiste em calcular os indicadores individuais e globais, onde é necessário recorrer a referências anuais: médias e desvios-padrões. Por exemplo, para o inversor 1 existe uma referência individual para cada um dos seus indicadores (Q1, Q2, Q3 e Q4), já para a análise geral, todos os inversores possuem a mesma referência, também ela definida para cada um dos indicadores. Com o intuito de melhor compreender os indicadores individuais e globais, apresentam-se de seguida dois gráficos onde se observam as variações desses indicadores, calculados para uma janela diária.

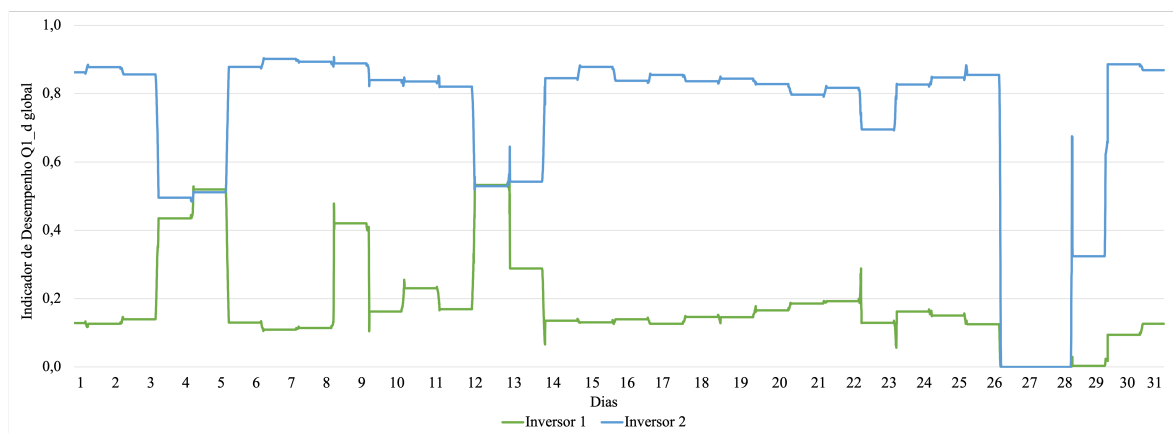


Figura 4.9: Indicador de desempenho Q1_d_glob para o inversor 1 e 2 no mês de Julho

O indicador global revela como um inversor se está a comportar relativamente ao desempenho típico dos restantes inversores ao longo de um ano, assim, o indicador é capaz de averiguar se um inversor está pior que os outros. Através da análise da Figura 4.9, observa-se que o inversor 2 tem um desempenho mais fraco que o inversor 1 no momento de arranque, para o mês de Julho de 2019.

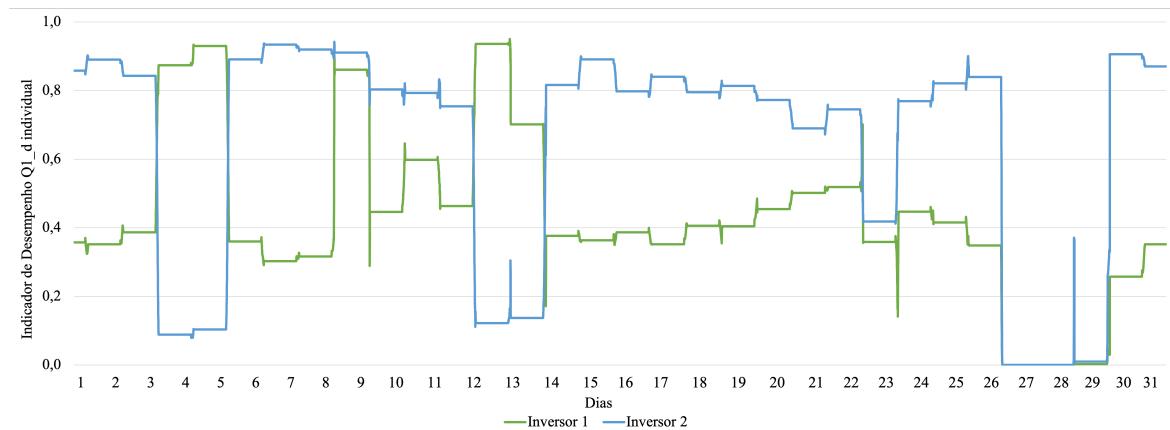


Figura 4.10: Indicador de desempenho Q1_d_ind para o inversor 1 e 2 no mês de Julho

Quanto ao indicador individual, ilustrado na Figura 4.10, permite compreender se o inversor está a ter um desempenho dentro do que era esperado ou não para o próprio, isto é, tem em consideração o seu registo histórico, ao longo de um ano. Embora se tenha observado na Figura 4.9 que o inversor 1 tinha um desempenho satisfatório relativamente aos restantes, ao observar o seu indicador individual, pode-se verificar que existiram dias onde este inversor se afastou da sua gama típica de funcionamento. Por exemplo, no dia 8 de Julho, o indicador Q1_d_ind do inversor 1 encontra-se num quantil a rondar os 0,8, o que significa que está 30% acima do seu valor médio de desvio, revelando um desempenho mais fraco.

Terminada a explicação dos indicadores de desempenho, importam destacar dois aspetos:

- Para um estudo mais completo e interessante, é indicado observar em conjunto os indicadores individuais e globais do respetivo elemento em análise;
- Relativamente às duas janelas temporais de análise, sabe-se que a análise diária será útil para detetar anomalias mais repentinas, porém, a análise semanal confere uma maior robustez e deteta problemas sistemáticos. Deste modo, é também indicado analisar em conjunto os indicadores diários e os semanais.

Capítulo 5

Resultados

O presente capítulo tem como objetivo testar e validar a metodologia desenvolvida, aplicando-a ao caso de estudo desta dissertação: a Central Fotovoltaica de Morgado de Apra, no concelho de Loulé. Assim, com o intuito de avaliar o desempenho dos componentes desta central FV, irá proceder-se ao cálculo dos diversos indicadores, os quais serão apresentados e discutidos ao longo deste capítulo.

5.1 Aspetos Gerais

A metodologia será aplicada recorrendo a registos históricos da central FV do ano de 2019. Portanto, os valores de referência que se estimaram têm em conta a produção daquele ano e são exclusivos da central em estudo.

Devido à grande dimensão da central FV, não se irão apresentar os indicadores de desempenho de todos os componentes. Assim, optou-se por expor, neste capítulo de resultados, a análise do ano de 2019 para os 4 inversores (Secção 5.2) e para 2 quadros de junção (Secção 5.3).

A avaliação de desempenho implementada baseia-se na análise dos quantis dos indicadores individuais e globais. Como já se referiu, estes indicadores variam entre 0 e 1 (podendo também ser apresentados em percentagem), onde valores mais elevados indicam comportamentos mais desfavoráveis, isto é, que se afastam mais do valor médio. Através deste método, é possível definir a partir de que quantil se quer disparar um alarme de aviso. Portanto, pode ficar ao encargo do operador da central FV definir esse limite de alarme e, conseqüentemente, decidir a necessidade de intervenção.

Como já foi explicado na secção 4.2, os indicadores Q1, Q2, Q3 e Q4 são calculados para determinadas horas do dia, tendo que seguir os critérios já mencionados. Para a análise desta central FV, observou-se para cada mês a produção num dia claro. A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos para cada mês, entenda-se o "Intervalo $Q1 \rightarrow Q2$ " como o limite de análise do indicador Q1, isto é, hora a partir da qual se começa a calcular o Q2, aplica-se a mesma lógica aos restantes intervalos.

Tabela 5.1: Atribuição dos limites horários para cada mês de 2019

Mês	Intervalo Q1 → Q2	Intervalo Q2 → Q3	Intervalo Q3 → Q4
1	9h	12h30	16h
2	9h	13h	16h30
3	8h30	13h	16h30
4	9h30	13h30	17h30
5	9h	13h30	17h30
6	9h	13h30	17h30
7	9h30	14h	17h30
8	9h20	13h30	17h30
9	9h20	13h30	17h20
10	9h20	13h30	17h
11	8h40	12h20	15h30
12	9h	12h30	15h40

5.2 Análise de Desempenho dos Inversores

A central FV em estudo possui 4 inversores centrais e serão avaliadas as suas produções, no ano de 2019. Inicialmente, antes de proceder ao cálculo dos indicadores de desempenho, será realizada uma caracterização mensal da produção de cada inversor.

5.2.1 Caracterização da Produção

A caracterização energética tem como objetivo conhecer e comparar os níveis de produção de cada um dos inversores, mês a mês, durante o ano de 2019. Assim, consegue-se entender à partida, se algum dos inversores está sistematicamente abaixo dos restantes.

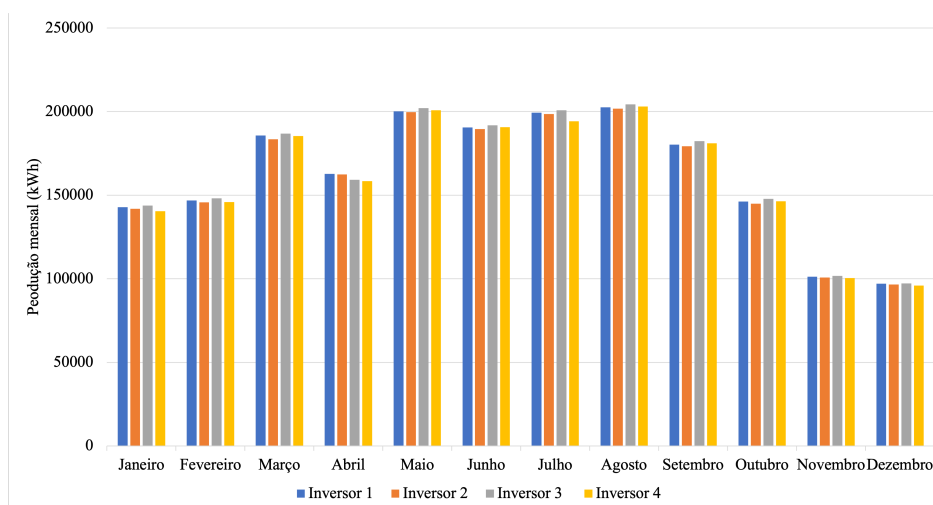


Figura 5.1: Caracterização energética dos quatro inversores durante o ano de 2019

De uma forma geral, pode-se concluir que não existem grandes discrepâncias nos comportamentos dos quatro inversores ao longo dos meses de 2019, porém a maior diferença regista-se no inversor 4, em Julho. Para ser possível comparar numericamente, apresentam-se de seguida os valores exatos de produção mensal, com uma escala de cores, onde a verde se encontram as produções mais altas de cada mês e a vermelho as mais baixas.

Tabela 5.2: Comparação da produção mensal dos quatro inversores

Mês	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3	Inversor 4
Janeiro	142826	141829	143766	140403
Fevereiro	146817	145713	148169	145865
Março	185677	183461	186872	185329
Abril	162701	162423	159252	158389
Maio	200207	199607	202140	200775
Junho	190484	189498	191726	190642
Julho	199372	198581	200836	194283
Agosto	202485	201695	204344	203036
Setembro	180193	179338	182327	181006
Outubro	146259	144978	147878	146422
Novembro	101293	100753	101652	100396
Dezembro	97111	96582	97212	95866
Total (kWh)	1955423	1944459	1966173	1942413

Verifica-se que o inversor 3 é na maioria dos meses o inversor com produções mais altas e, como tal, é o que produz mais na totalidade do ano de 2019, já os inversores 2 e 4 são os que apresentam valores mais baixos. Através das produções da Tabela 5.2, foi possível estimar o desvio que a central registou relativamente ao máximo que foi verificado nesse ano, tendo registado um desvio de energia de cerca de 1%, ou seja, as perdas anuais são cerca de 1%.

A diferença que se tinha verificado no gráfico da Figura 5.1, relativamente a Julho, é suportada pela Tabela 5.2, onde se observa que os inversores 1, 2 e 3 apresentam produções a rondar os 200 MWh e, por sua vez, o inversor 4 regista uma produção na ordem dos 194 MWh. Através desta análise muito geral, pode-se ficar já com uma suspeita de avaria no inversor 4, no mês de Julho.

Importa realçar que a caracterização elétrica que foi realizada nesta secção não faz parte da metodologia implementada, ela é apenas interessante de analisar para o humano e foi apresentada para complementar o estudo.

5.2.2 Análise dos Indicadores de Desempenho

A presente secção destina-se ao cálculo dos indicadores para os quatro inversores da central FV. Para começar, é necessário analisar cada mês e calcular os seus indicadores Q1, Q2, Q3 e Q4,

tanto para a análise diária como para a análise semanal. Após obter esses indicadores, calculam-se as médias e os desvios-padrões dos mesmos para cada mês e, deste modo, encontram-se as referências anuais para cada indicador.

Nas Tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 do Anexo A, estão apresentados os valores obtidos para cada mês e a referência anual dos indicadores Q1_d, Q2_d, Q3_d e Q4_d para cada inversor. Lembra-se que a referência anual é obtida através da média dos valores registados para cada mês, tanto para o desvio-padrão como para a média. Neste capítulo, optou-se por apresentar os resultados graficamente para se tornar uma análise mais intuitiva visualmente.

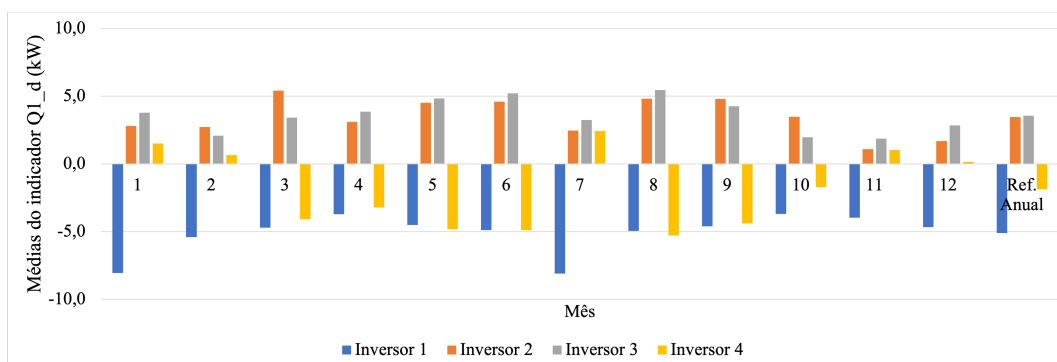


Figura 5.2: Análise mensal das médias do indicador Q1_d para os quatro inversores

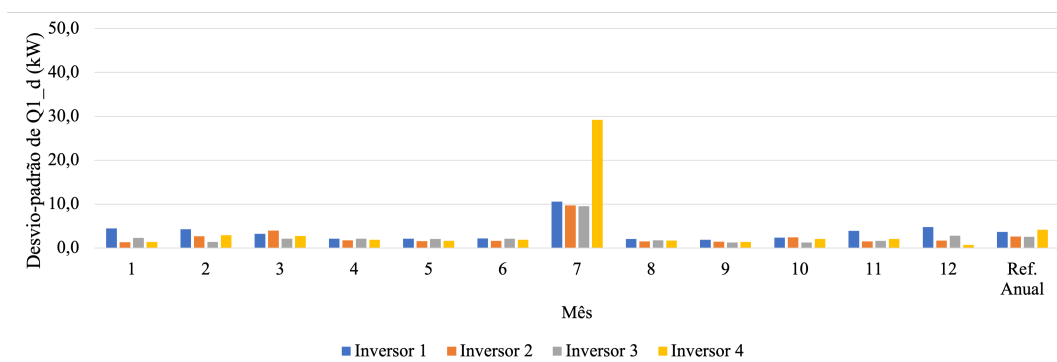


Figura 5.3: Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q1_d para os quatro inversores

Pode-se observar uma tendência do inversor 1 e, de modo geral, do inversor 4 também, para se destacarem ao início da manhã, isto é, apresentam médias negativas, como se vê no gráfico da Figura 5.2. De notar que, como já referido no Capítulo 4, desvios negativos significam produções acima da média, ou seja, situações de bom desempenho.

Quanto ao desvio-padrão, representado na Figura 5.3, observam-se valores tipicamente baixos, exceto no mês de Julho que se registam maiores desvios-padrões. Um desvio-padrão elevado indica uma dispersão elevada dos indicadores relativamente ao seu valor médio, ou seja, existe uma gama de valores mais ampla. Assim, mais uma vez, destaca-se o inversor 4 pela negativa no mês de Julho.

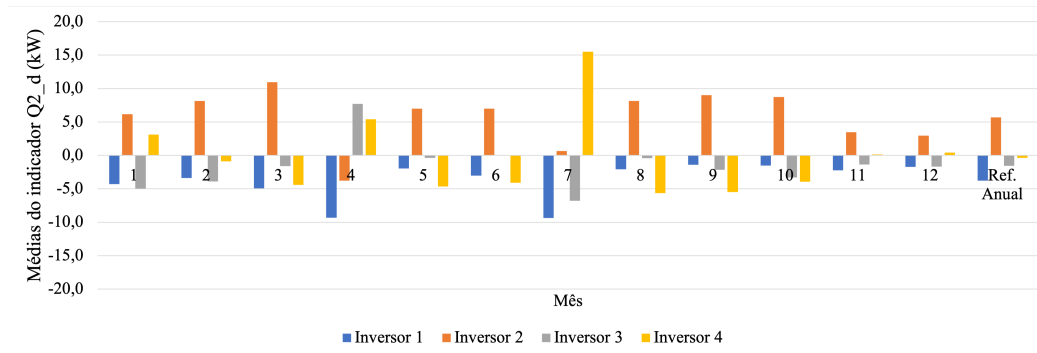


Figura 5.4: Análise mensal das médias do indicador Q2_d para os quatro inversores

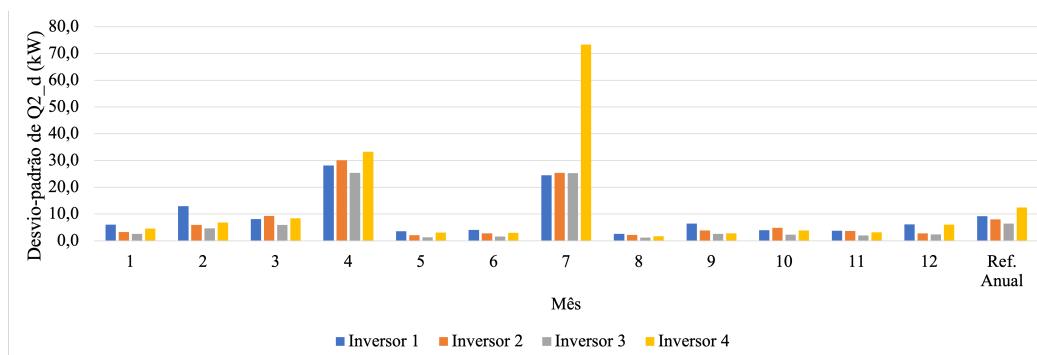


Figura 5.5: Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q2_d para os quatro inversores

Analisando agora o momento do fim da manhã (indicador Q2), observa-se que o inversor 1 continua acima da média de produção, em vários meses do ano. O inversor 3, face ao observado na Figura 5.2, começa nesta altura do dia a produzir acima da média, exceto no mês de Abril. Complementando esta análise com a Figura 5.5, entende-se que, no mês de Abril, existiu uma grande dispersão dos indicadores, nos quatro inversores. Novamente para o mês de Julho, o inversor 4 apresenta um desvio-padrão bastante superior comparativamente aos restantes inversores.

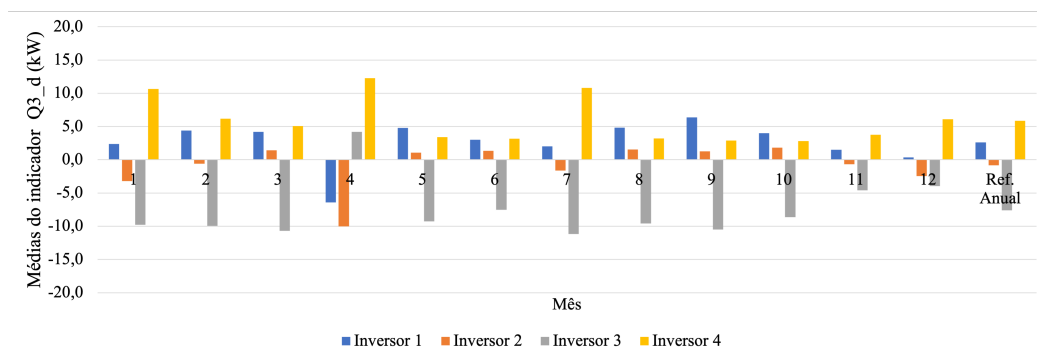


Figura 5.6: Análise mensal das médias do indicador Q3_d para os quatro inversores

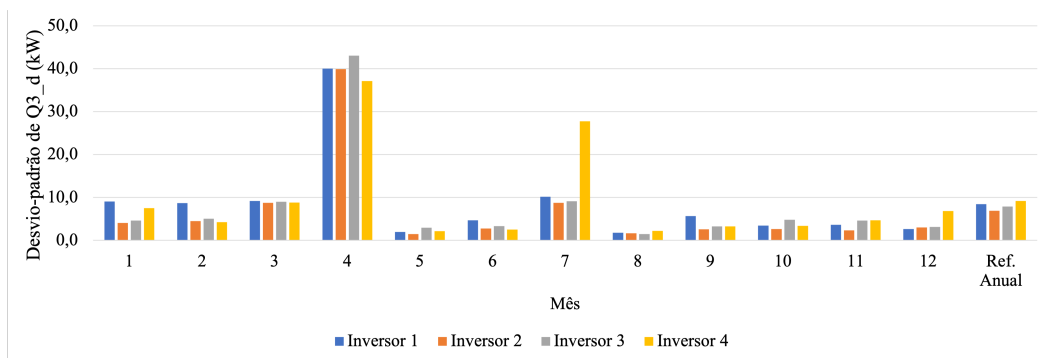


Figura 5.7: Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q3_d para os quatro inversores

O indicador Q3 é analisado no período de início da tarde e pode-se concluir que, nesse intervalo, o inversor 3 está sempre acima da média de produção, menos no mês de Abril. O inversor 1 e 2 tendem a estar com produções abaixo da média para esta altura do dia. Relativamente ao gráfico da Figura 5.7, o mês de Abril destaca-se pelo facto de possuir uma grande dispersão nos indicadores calculados e verificou-se para os quatro inversores.

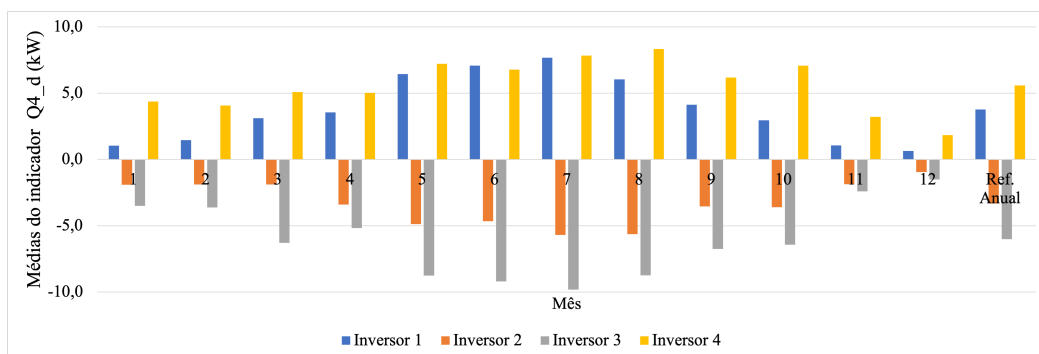


Figura 5.8: Análise mensal das médias do indicador Q4_d para os quatro inversores

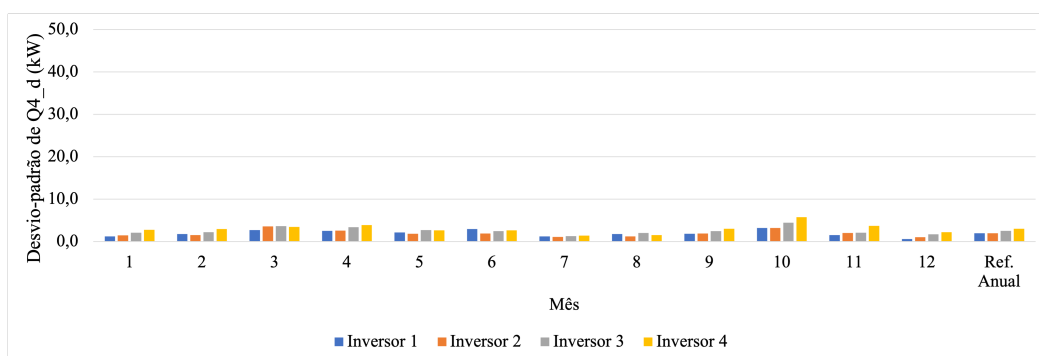


Figura 5.9: Análise mensal dos desvios-padrões do indicador Q4_d para os quatro inversores

Por último, analisa-se o momento do final do dia (indicador Q4), onde se verifica uma tendência do inversor 2 e 3 em produzir acima da média. Já no caso da manhã verificou-se o contrário, tendo o inversor 1 e 4 desempenhos superiores. Esta tendência pode estar relacionada com a localização das *strings* ligadas a esses inversores e com a sombra que as mesmas sofrem ao longo do dia.

De notar que nos gráficos anteriores existia uma referência para cada inversor, assim, a "Ref. anual" apresentada dizia respeito ao valor de referência que será utilizado no cálculo dos indicadores individuais de cada inversor.

Para o cálculo dos indicadores globais existe uma única referência para cada momento do dia, ou seja, é calculada uma referência para cada indicador Q1, Q2, Q3 e Q4 que engloba as produções dos quatro inversores. A referência anual, como já se referiu, é composta por uma média e um desvio-padrão. Relativamente à média dos indicadores, a sua média é nula, uma vez que os desvios sofridos relativamente ao valor médio se anulam uns aos outros. Quanto aos desvios-padrões de cada indicador, apresentam-se os resultados obtidos no gráfico da Figura 5.10 e na Tabela A.5.

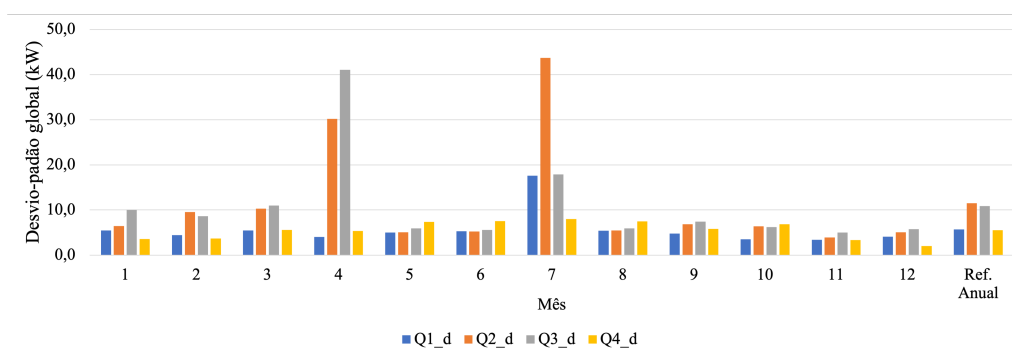


Figura 5.10: Análise global dos desvios-padrões dos indicadores Q1_d, Q2_d, Q3_d e Q4_d

As referências analisadas até ao momento foram calculadas para uma janela diária, mas, como já foi referido, existem também indicadores de desempenho para uma janela semanal. Como será expectável, esta análise não apresentará valores mais elevados relativamente aos valores obtidos anteriormente na janela diária, uma vez que ao realizar médias numa janela temporal mais larga os desvios sofridos são suavizados. Como já foi referido, a análise da janela semanal terá especial interesse e utilidade para sinalizar falhas sistemáticas.

A tendência que se tinha verificado na análise de janela diária manteve-se na janela semanal. Encontra-se no Anexo A, Secção A.2, as tabelas com os valores obtidos para os indicadores de janela semanal.

Toda a análise realizada ao longo desta secção teve como objetivo conhecer as referências anuais (média e desvio-padrão) que irão ser utilizadas para o cálculo dos indicadores individuais e dos indicadores globais, tanto para a janela diária como para a janela semanal. Assim, conhecidas as referências anuais de cada inversor, reúnem-se as condições necessárias para apresentar alguns casos de falhas detetadas com a avaliação dos indicadores de desempenho globais e individuais.

5.2.2.1 Caso de Falha 1- Inversor 1

O primeiro caso de falha a avaliar ocorre na primeira semana de Fevereiro, nomeadamente nos dias 4/2 e 5/2, como ilustrado na Figura 5.11.

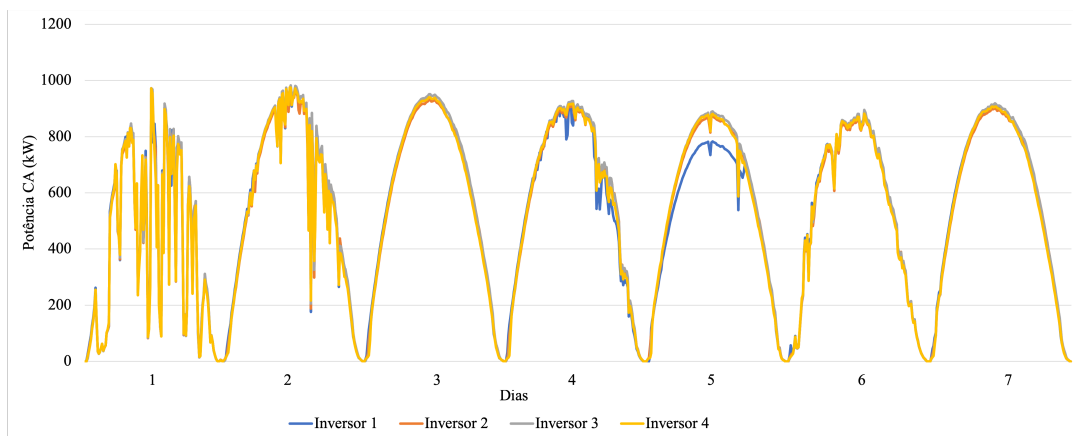


Figura 5.11: Produção dos quatro inversores na 1ª semana de Fevereiro

No dia 5/2/2019, observa-se uma descida drástica de produção do inversor 1 (representado a azul), desde o meio da manhã até ao meio da tarde. Relativamente ao dia anterior, não se observa algo tão acentuado, todavia já se verificam algumas descidas de produção no inversor.

Importa agora entender se os indicadores de desempenho desenvolvidos conseguem detetar esta falha do inversor 1. Definiram-se os quantis de alerta a partir de 0,85, ou seja, pretende-se filtrar 15% dos valores que mais se afastaram da referência anual global e individual.

Tabela 5.3: Análise dos indicadores diários globais do inversor 1

Data	Q1_d_glob	Q2_d_glob	Q3_d_glob	Q4_d_glob
04/02/19 14:45	0,02	0,68	0,84	0,62
04/02/19 14:50	0,02	0,68	0,87	0,62
		↓		
04/02/19 16:50	0,02	0,68	1,00	0,84
04/02/19 16:55	0,02	0,68	1,00	0,87
		↓		
05/02/19 09:00	0,83	0,68	1,00	0,95
05/02/19 09:05	0,87	0,70	1,00	0,95
		↓		
06/02/19 07:40	0,85	1,00	1,00	0,58
06/02/19 07:45	0,84	1,00	1,00	0,58
		↓		
06/02/19 14:25	0,26	0,34	0,85	0,58
06/02/19 14:30	0,26	0,34	0,82	0,58

Pode-se observar que o inversor 1 começou a ter um desempenho mais fraco relativamente aos seus pares, sendo o primeiro alerta no dia 4/2 no indicador Q3_d_glob, ou seja, no período de início da tarde. A partir desse momento, todos os indicadores globais foram aumentando, sendo que na manhã de 5/2 já estão todos acima dos 0,85. O indicador Q3 foi o primeiro a normalizar, isto é, a ficar abaixo do valor de alarme, de seguida foi o Q1. Os indicadores Q2 e Q3 persistiram durante mais tempo, tendo saída de alerta dia 6/2 às 12h10 e e 14h30, respetivamente.

Após analisar o comportamento do inversor 1 relativamente aos seus pares, importa também avaliar o seu comportamento de forma individual, para entender se é algo comum de acontecer.

Tabela 5.4: Análise dos indicadores diários individuais do inversor 1

Data	Q1_d_ind	Q2_d_ind	Q3_d_ind	Q4_d_ind
04/02/19 14:45	0,03	0,84	0,84	0,13
04/02/19 14:50	0,03	0,84	0,87	0,13
↓				
04/02/19 16:50	0,03	0,84	1,00	0,82
04/02/19 16:55	0,03	0,84	1,00	0,90
↓				
05/02/19 09:00	1,00	0,84	1,00	1,00
05/02/19 09:05	1,00	0,85	1,00	1,00
↓				
06/02/19 08:55	0,87	1,00	1,00	0,09
06/02/19 09:00	0,77	1,00	1,00	0,09
↓				
06/02/19 14:20	0,66	0,46	0,89	0,09
06/02/19 14:25	0,66	0,46	0,84	0,09

Os indicadores individuais e globais do inversor 1 apresentam um comportamento semelhante, o que permite concluir que se está perante uma situação anómala, uma vez que ambos os indicadores assumem valores elevados. Pelo que se observa na Figura 5.11, o inversor 1 terá voltado ao seu comportamento típico nos dias seguintes, o que pode indicar que se tenha intervenido na central FV para corrigir a falha.

Terminada a análise diária, importa analisar os indicadores de desempenho na janela semanal, os quais serão apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5: Análise dos indicadores semanais globais do inversor 1

Data	Q1_s_glob	Q2_s_glob	Q3_s_glob	Q4_s_glob
04/02/19 14:45	0,09	0,39	0,71	0,52
04/02/19 14:50	0,09	0,39	0,71	0,52
↓				
05/02/19 12:15	0,17	0,84	0,80	0,70
05/02/19 12:20	0,17	0,85	0,80	0,70
↓				
05/02/19 12:55	0,17	0,87	0,84	0,70
05/02/19 13:00	0,17	0,87	0,85	0,70
↓				
07/02/19 09:00	0,10	0,85	0,97	0,71
07/02/19 09:05	0,10	0,84	0,97	0,71
↓				
12/02/19 13:55	0,04	0,13	0,85	0,69
12/02/19 14:00	0,04	0,13	0,84	0,69

Tabela 5.6: Análise dos indicadores semanais individuais do inversor 1

Data	Q1_s_ind	Q2_s_ind	Q3_s_ind	Q4_s_ind
04/02/19 14:45	0,28	0,69	0,52	0,00
04/02/19 14:50	0,28	0,69	0,53	0,00
↓				
05/02/19 10:00	0,68	0,84	0,76	0,13
05/02/19 10:05	0,68	0,85	0,76	0,13
↓				
05/02/19 12:50	0,68	1,00	0,84	0,13
05/02/19 12:55	0,68	1,00	0,87	0,13
↓				
12/02/19 10:30	0,06	0,86	0,97	0,09
12/02/19 10:35	0,06	0,84	0,97	0,09
↓				
12/02/19 14:05	0,06	0,13	0,86	0,09
12/02/19 14:10	0,06	0,13	0,84	0,09

Da análise dos indicadores semanais pode-se concluir que, no momento em que começam a existir descidas de produção (início da tarde do dia 4/2), os indicadores não apresentam quaisquer valores de alerta. No dia seguinte, Q2 e Q3 já apresentam valores superiores a 0,85, registo este que se mantém até dia 12/2, tanto a nível global como individual. Como o indicador semanal tem em consideração a janela temporal dos valores registados na última semana, era de esperar que a

falha do dia 5/2 persistisse nesta análise até ao dia 12/2.

Assim, pode-se afirmar que a falha no inversor 1, na primeira semana de Fevereiro, foi sinalizada através dos diversos indicadores desenvolvidos. Para compreender melhor esta falha, observaram-se as produções, na mesma semana, dos diversos quadros de junção do inversor 1:

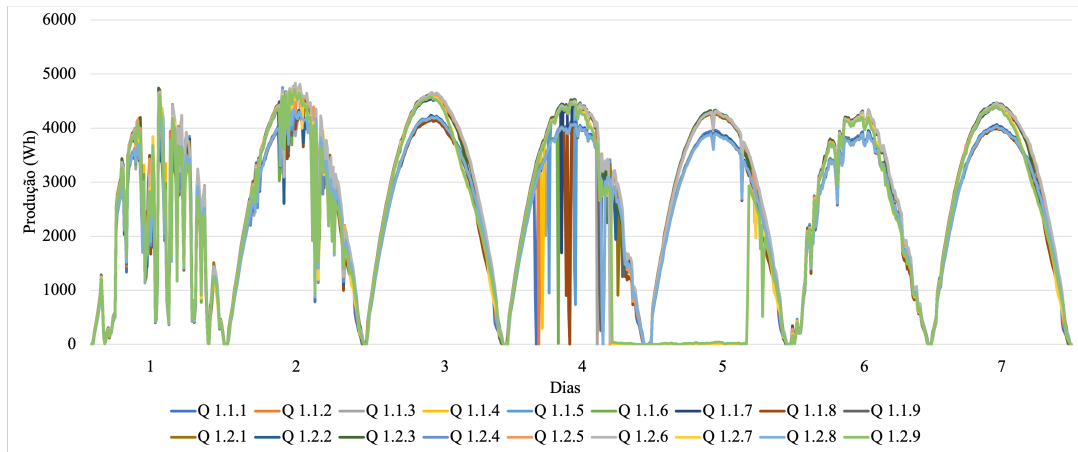


Figura 5.12: Produção dos quadros de junção do inversor na 1ª semana de Fevereiro

É possível verificar que no dia 4 vários quadros tiveram produções nulas em determinados momentos do dia, em horas que não seria espectável isso acontecer. A situação mais drástica acontece no Q 1.2.7 e no Q 1.2.9 que não produziram qualquer energia desde dia 4, a meio da tarde, até dia 5, a meio da tarde. Pode-se tratar de um problema no controlo do MPPT, uma vez que estes dois quadros de junção se encontram ligados no mesmo, como se mostra na Figura 5.13.

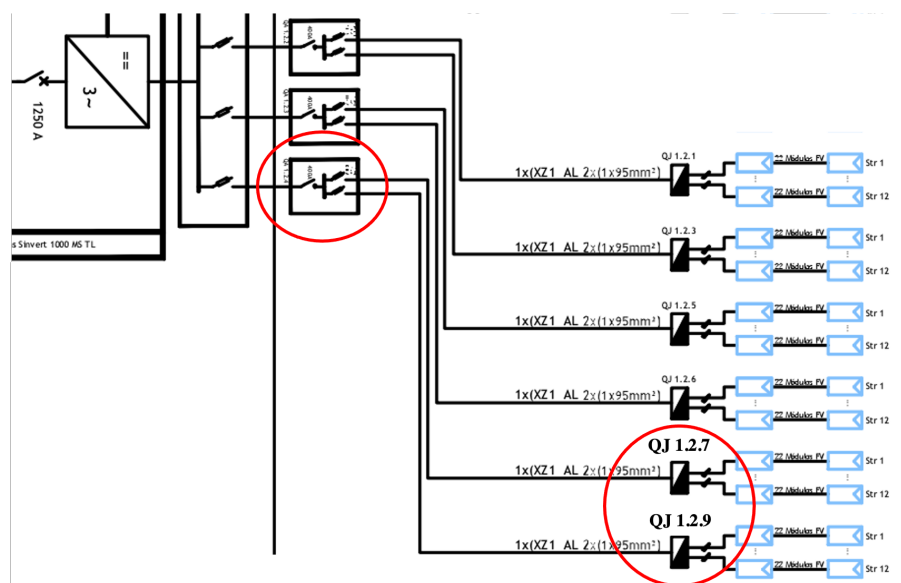


Figura 5.13: Recorte do esquema unifilar da central em estudo

5.2.2.2 Caso de Falha 2- Inversor 4

Neste segundo caso de falha, pretende-se avaliar o comportamento do inversor 4 no mês de Julho, porque, tal como já se conclui na Secção 5.2.1, o inversor produziu consideravelmente menos que os seus pares, pelo que se suspeita logo de uma avaria. O mês de Julho iniciou-se sem discrepâncias entre o inversor 4 e os restantes, porém, na fase final do mês registaram-se situações anómalas, como se ilustra na Figura 5.14.

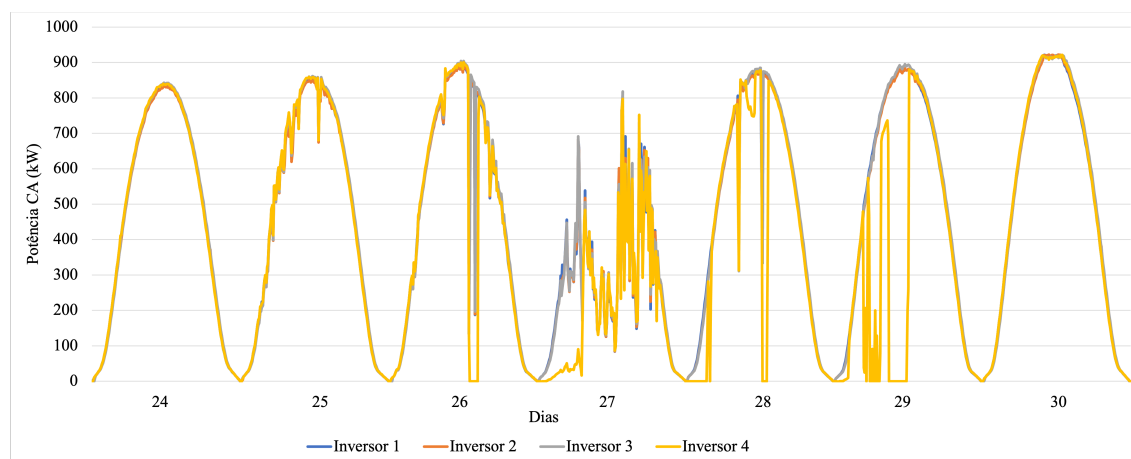


Figura 5.14: Produção dos quatro inversores numa semana de Julho

Percebe-se que até dia 25/7 o inversor 4 estava com um comportamento semelhante aos seus pares, todavia, no dia 26, após o pico de produção, o inversor desliga-se. Sensivelmente uma hora após esse acontecimento, o inversor 4 reinicia a sua produção e o problema parece ter ficado resolvido. Contudo, no dia a seguir, o inversor 4 demonstra problemas no arranque, apenas conseguindo igualar os restantes inversores já a meio da manhã. Nos dias 28 e 29, também se observam arranques tardios comparativamente aos outros inversores, mas os problemas não acontecem apenas no arranque, também se observam falhas ao longo desses dias, especialmente antes de atingir a altura do pico de produção.

Importa agora entender se os indicadores desenvolvidos são eficazes a detetar as falhas que foram identificadas graficamente. De forma idêntica ao caso anterior, optou-se pelo quantil 0,85 para filtrar os indicadores.

As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam a análise dos indicadores de desempenho globais e individuais, respetivamente, para o período de 24/7 a 30/7.

Tabela 5.7: Análise dos indicadores diários globais do inversor 4

Data	Q1_d_glob	Q2_d_glob	Q3_d_glob	Q4_d_glob
26/07/19 14:15	0,12	0,28	0,68	0,93
26/07/19 14:20	0,12	0,28	0,88	0,93
↓				
27/07/19 08:00	0,80	0,28	1,00	0,94
27/07/19 08:05	0,92	0,28	1,00	0,94
↓				
27/07/19 09:55	1,00	0,84	1,00	0,94
27/07/19 10:00	1,00	0,91	1,00	0,94
↓				
28/07/19 10:35	1,00	0,96	0,65	0,98
28/07/19 10:40	1,00	0,84	0,65	0,98
↓				
28/07/19 13:10	1,00	0,82	0,65	0,98
28/07/19 13:15	1,00	0,85	0,65	0,98
↓				
28/07/19 14:00	1,00	0,94	0,65	0,98
28/07/19 14:05	1,00	0,95	0,96	0,98
↓				
29/07/19 14:30	1,00	1,00	0,91	0,95
29/07/19 14:35	1,00	1,00	0,68	0,95
↓				
30/07/19 09:30	0,87	1,00	0,58	0,95
30/07/19 09:35	0,09	1,00	0,58	0,95
↓				
30/07/19 13:40	0,09	0,88	0,58	0,95
30/07/19 13:45	0,09	0,64	0,58	0,95

Tabela 5.8: Análise dos indicadores diários individuais do inversor 4

Data	Q1_d_ind	Q2_d_ind	Q3_d_ind	Q4_d_ind
26/07/19 14:20	0,13	0,31	0,78	0,82
26/07/19 14:25	0,13	0,31	0,99	0,82
↓				
27/07/19 07:55	0,83	0,31	1,00	0,83
27/07/19 08:00	0,95	0,31	1,00	0,83
↓				
27/07/19 09:55	1,00	0,83	1,00	0,83
27/07/19 10:00	1,00	0,90	1,00	0,83
↓				
27/07/19 15:05	1,00	1,00	0,96	0,83
27/07/19 15:10	1,00	1,00	0,55	0,83
↓				
27/07/19 17:40	1,00	1,00	0,43	0,74
27/07/19 17:45	1,00	1,00	0,43	0,85
↓				
28/07/19 10:35	1,00	0,94	0,43	0,98
28/07/19 10:40	1,00	0,83	0,43	0,98
↓				
28/07/19 13:55	1,00	0,84	0,43	0,98
28/07/19 14:00	1,00	0,93	0,43	0,98
28/07/19 14:05	1,00	0,93	0,93	0,98
↓				
29/07/19 14:25	1,00	1,00	1,00	0,87
29/07/19 14:30	1,00	1,00	0,83	0,87
↓				
30/07/19 09:30	0,98	1,00	0,35	0,87
30/07/19 09:35	0,09	1,00	0,35	0,87
↓				
30/07/19 13:40	0,09	0,86	0,35	0,87
30/07/19 13:45	0,09	0,64	0,35	0,87

Pela análise da Tabela 5.7, pode-se concluir que o inversor 4 esteve em vários momentos daquela semana abaixo da média de produção, isto é, registou um desvio elevado dos seus pares. Note-se que, para o indicador do final da tarde (Q4), o inversor 4 passou o mês de Julho sempre com o desempenho abaixo da média global. Porém, ao observar esse mesmo indicador, mas no contexto individual (Tabela 5.8), percebe-se que era um comportamento normal para o inversor 4, isto é, relativamente ao seu histórico, não estava acima do quantil de alerta.

No dia 26, como já foi referido, após o pico de produção, existe uma falha no inversor 4, a qual é detetada pelo indicador Q3_d_glob, que passa de um quantil de 0,68 para 0,88, e no indicador Q3_d_ind que sobe de 0,78 para 0,99. Sempre que um indicador global e um indicador individual assumem, simultaneamente, valores elevados, pode-se afirmar que a probabilidade de estar a ocorrer uma falha é grande. Tal pode ser concluído, uma vez que o desempenho registado é fraco tanto relativamente aos seus pares, como relativamente ao seu histórico.

Já no dia 27, o problema no arranque do inversor 4 também é sinalizado pelos indicadores Q1_d_glob e Q1_d_ind, assumindo o valor de 1,00 para ambos os quantis. Este problema no arranque mantém-se alerta durante os dias seguintes, apenas normalizando na manhã de dia 30.

Relativamente ao indicador do fim da manhã (Q2), existem mais variações, sendo que as mais drásticas acontecem no dia 28 e 29 e são detetadas pelos indicadores Q2_d_glob e Q2_d_ind. Como se está a analisar numa janela diária, era espectável que as falhas do dia 29, ainda fizessem o indicador do dia seguinte assumir um valor elevado, porém este valor foi descendo à medida que o dia 30 ia decorrendo, uma vez que o problema já estava resolvido.

Após concluir a análise diária, prossegue-se para a avaliação dos indicadores de desempenho semanais, que serão apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9: Análise dos indicadores semanais globais do inversor 4

Data	Q1_s_glob	Q2_s_glob	Q3_s_glob	Q4_s_glob
26/07/19 14:20	0,12	0,29	0,77	0,92
26/07/19 14:25	0,12	0,29	0,86	0,92
↓				
27/07/19 08:45	0,83	0,29	1,00	0,93
27/07/19 08:50	0,88	0,29	1,00	0,93
↓				
27/07/19 10:35	1,00	0,83	1,00	0,93
27/07/19 10:40	1,00	0,86	1,00	0,93

Da análise dos indicadores semanais globais, entende-se que o inversor 4 já vinha a registar um mau desempenho comparativamente aos seus pares ao final da tarde (Q4). A descida de produção no dia 26 foi de tal forma drástica, que até o indicador Q3_s_glob subiu de 0,77 para 0,86. A Tabela 5.10 vem suportar as conclusões retiradas anteriormente, ou seja, o inversor 4 estava a desviar-se da produção média dos restantes inversores e também da sua média global. Quanto aos problemas de arranque que se registaram no inversor 4, os indicadores Q1_s_glob e Q1_s_ind sinalizaram essas anomalias a partir de dia 27 e mantiveram em alerta até ao final do mês. O mesmo aconteceu com os indicadores Q2_s_glob e Q2_s_ind.

Tabela 5.10: Análise dos indicadores semanais individuais do inversor 4

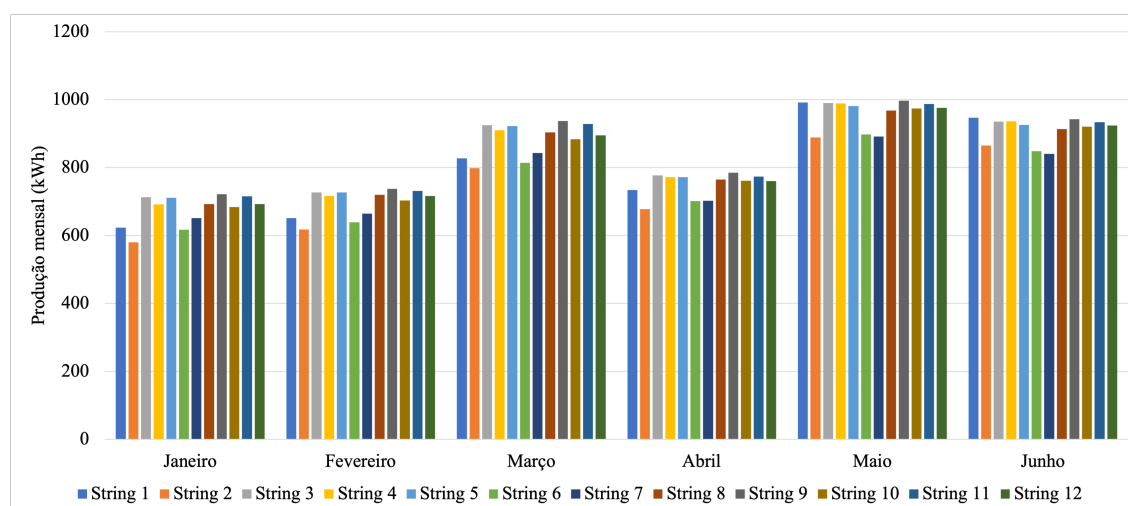
Data	Q1_s_ind	Q2_s_ind	Q3_s_ind	Q4_s_ind
26/07/19 14:25	0,04	0,32	0,73	0,89
26/07/19 14:30	0,04	0,32	0,91	0,89
↓				
27/07/19 08:20	0,76	0,32	1,00	0,91
27/07/19 08:25	0,87	0,32	1,00	0,91
↓				
27/07/19 10:15	1,00	0,82	1,00	0,91
27/07/19 10:20	1,00	0,87	1,00	0,91

5.3 Análise de Desempenho de *Strings*

A central FV em estudo possui 4 inversores e uma vez que cada inversor possui 18 quadros de junção, optou-se apenas por analisar, neste capítulo, as *strings* de 2 quadros de junção: Q 4.1.2 e Q 1.2.7. Inicialmente, antes de proceder ao cálculo dos indicadores de desempenho, será realizada uma caracterização mensal da produção de cada um desses quadros.

5.3.1 Caracterização da Produção

A caracterização energética tem como objetivo conhecer e comparar os níveis de produção de cada uma das *strings*, mês a mês, durante o ano de 2019. Assim, consegue-se entender à partida, se alguma das *strings* está sistematicamente abaixo das restantes.

Figura 5.15: Caracterização energética das *strings* do Q 4.1.2 nos primeiros 6 meses de 2019

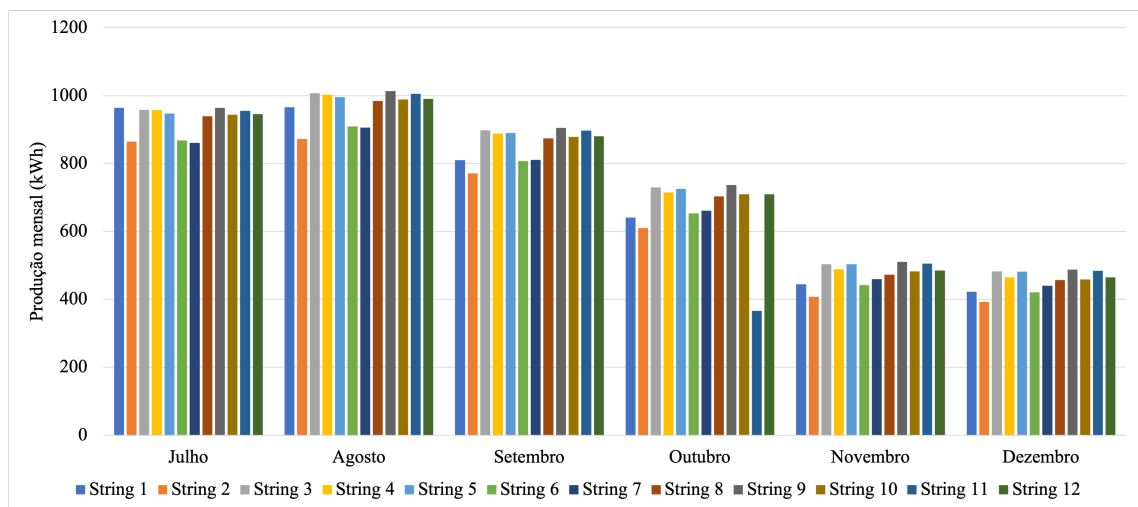


Figura 5.16: Caracterização energética das *strings* do Q 4.1.2 nos últimos 6 meses de 2019

De uma forma geral, pode-se observar que as *strings* 6, 7 e 2 estão constantemente a produzir menos que as restantes, em todos os meses do ano. Também é possível verificar uma grande discrepância na produção da *string* 11 relativamente às restantes, no mês de Outubro, situação que vai ser analisada na Secção 5.3.2.1.

Na Figura 5.15, observa-se que para os meses de Maio e Junho a *string* 8 não possui valores de produção. Portanto, pode-se deduzir que tenha acontecido um erro de comunicação e, como tal, estes dois meses foram excluídos para a obtenção da referência desta *string*.

Após apresentar a caracterização energética do quadro de junção 4.1.2, segue-se para o mesmo tipo de caracterização para o quadro de junção 1.2.7. Os gráficos das Figuras 5.17 e 5.18 ilustram as variações das produções das *strings* para cada mês de 2019.

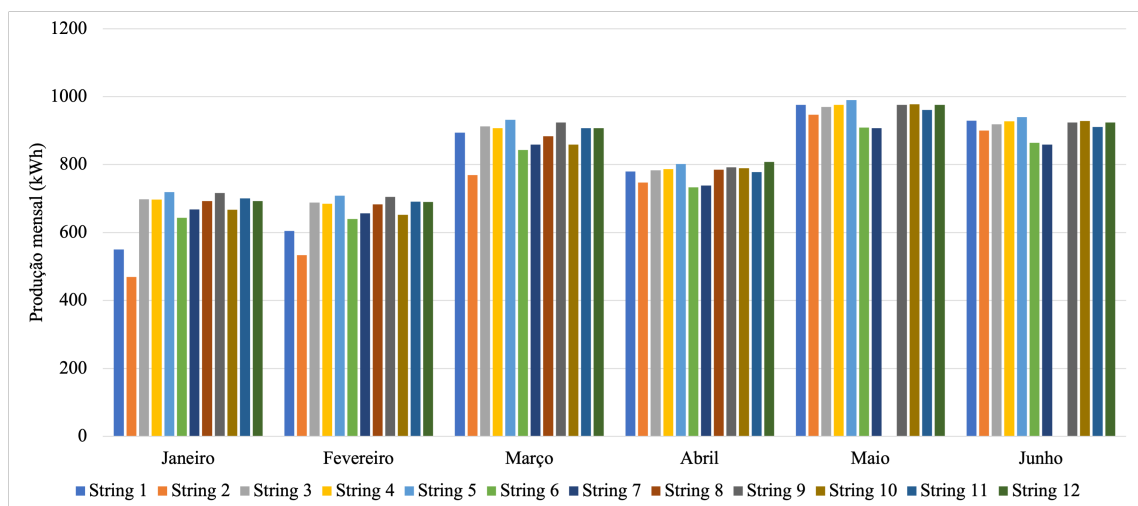


Figura 5.17: Caracterização energética das *strings* do Q 1.2.7 nos primeiros 6 meses de 2019

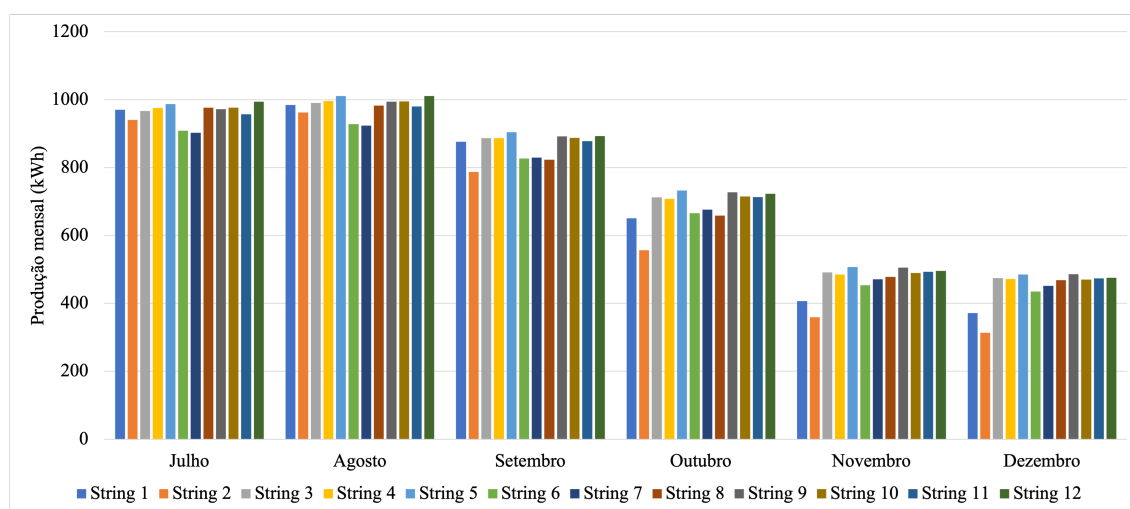


Figura 5.18: Caracterização energética das *strings* do Q 1.2.7 nos últimos 6 meses de 2019

De forma idêntica ao quadro anterior, as *strings* 6 e 7 deste quadro de junção também se encontram na maioria dos meses com uma produção mais baixa que as restantes *strings*, situação que vai ser analisada na Secção 5.3.2.2.

Também se pode observar que as *strings* 1 e 2 possuem um desempenho mais baixo que as restantes *strings* durante os dois primeiros meses do ano, normalizando nos seguintes meses e, depois, nos últimos três meses do ano voltam a apresentar um desempenho mais fraco relativamente às restantes. Este problema destacado anteriormente pode estar relacionado com as sombras que estas *strings* sofrem e que vão variando ao longo do ano, devido à posição do Sol.

5.3.2 Análise dos Indicadores de Desempenho

A presente secção destina-se ao cálculo dos indicadores de desempenho para as *strings* de dois quadros de junção da central FV: Q 4.1.2 e Q 1.2.7. Para começar, é necessário para cada quadro analisar cada mês e calcular os seus indicadores Q1, Q2, Q3 e Q4 para as várias *strings*, tanto para a análise diária como para a análise semanal. Após obter esses indicadores, calculam-se as médias e os desvios-padrões dos mesmos para cada mês, para assim se encontrar as referências anuais de cada indicador.

No Anexo B, encontram-se as Tabelas B.1, B.2, B.5 e B.6 que indicam as referências anuais para os quadros de junção 4.1.2 e 1.2.7. Dado o elevado número de indicadores de desempenho, optou-se por apresentar apenas as referências anuais obtidas e não os valores intermédios para cada mês.

Neste capítulo, optou-se por apresentar os resultados graficamente para se tornar uma análise mais intuitiva visualmente. Começando pela análise ao quadro de junção 4.1.2, apresentam-se de seguida os gráficos com as referências anuais para 2019.

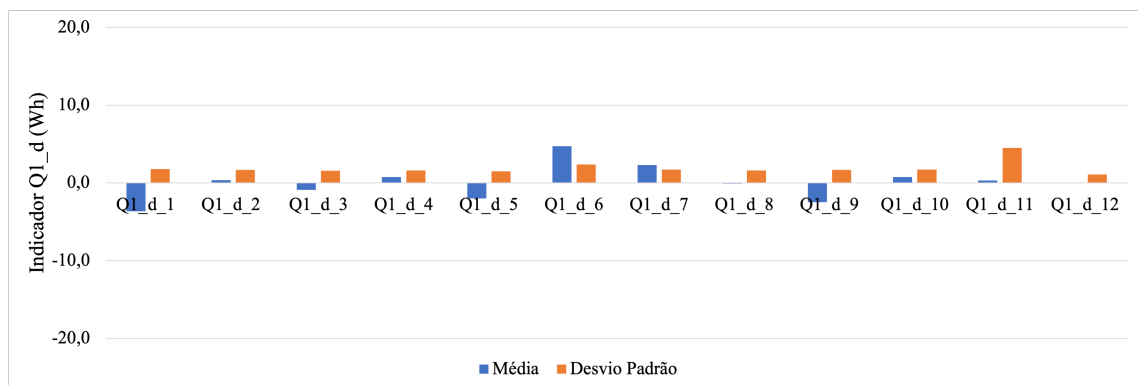


Figura 5.19: Referências de Q1_d para as *strings* do Q 4.1.2

O indicador do início da manhã, representado na Figura 5.19, não apresenta grandes diferenças de desempenho entre as 12 *strings*. Porém, pode-se reparar que a *string* 6 apresenta o valor médio mais elevado, ou seja, é a que se afasta mais da média de produção. Relativamente ao desvio padrão, destaca-se a *string* 11 com o valor de referência mais elevado.

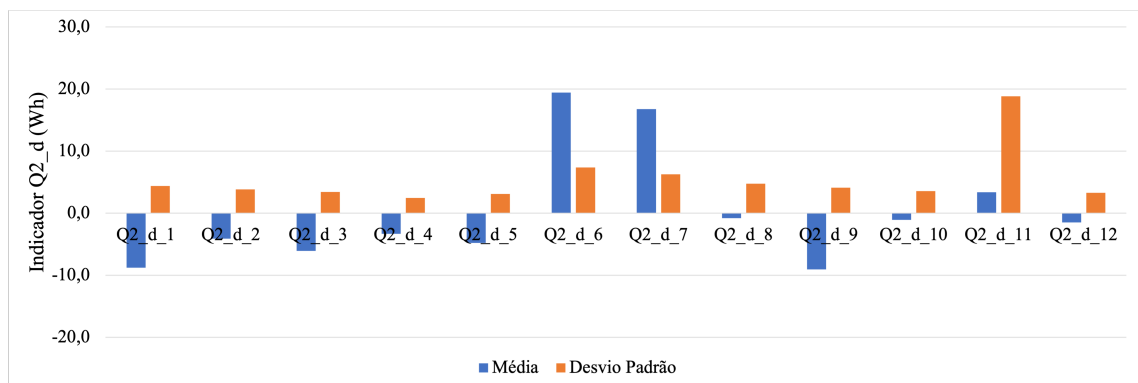


Figura 5.20: Referências de Q2_d para as *strings* do Q 4.1.2

Já no indicador de final da manhã, registam-se valores de referência mais discrepantes. As *strings* 6 e 7 destacam-se pela negativa, com médias muito elevadas face às restantes *strings*, o que significa que as duas *strings* se desviam bastante da média de produção. Novamente a *string* 11 realça-se pelo seu valor de desvio-padrão elevado.

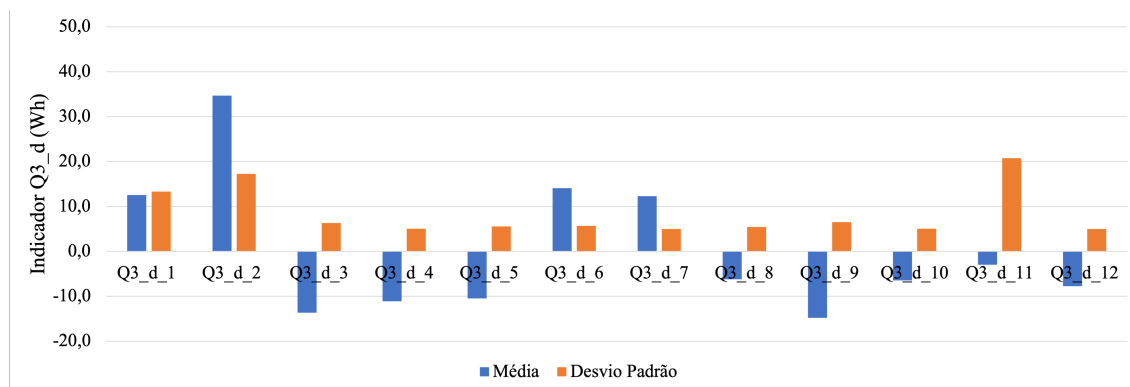


Figura 5.21: Referências de Q3_d para as *strings* do Q 4.1.2

Ao início da tarde observa-se que as *strings* com pior desempenho são a 2, 6, 7 e 1. Quanto à *string* 11, apresenta uma média negativa do indicador Q3_d, ou seja, está acima da média de produção. Todavia, apresenta uma elevada dispersão nos seus valores, sendo o maior valor de desvio-padrão em comparação com as outras *strings*.

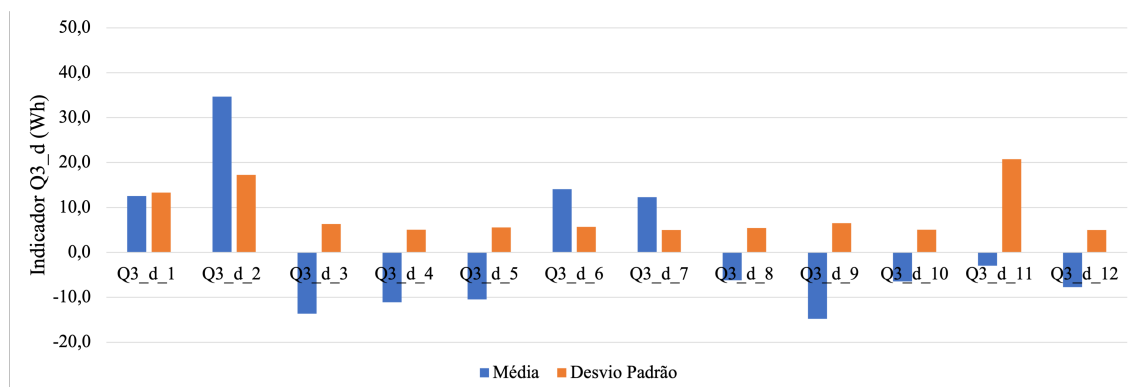


Figura 5.22: Referências de Q4_d para as *strings* do Q 4.1.2

Para terminar a análise do Q 4.1.2, analisa-se agora o momento do final do dia, onde, obviamente, as *strings* 1 e 2 estão com um desempenho muito abaixo da média e apresentam também um elevado desvio-padrão. Será de esperar um comportamento atípico nestas *strings*.

Em relação ao quadro de junção 1.2.7, apresentam-se, de seguida, os gráficos que ilustram as referências anuais para os indicadores deste quadro.

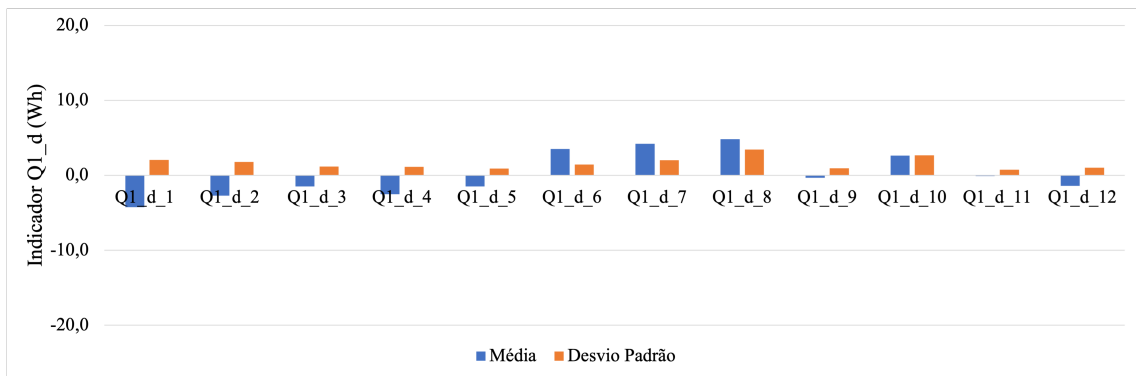


Figura 5.23: Referências de Q1_d para as strings do Q 1.2.7

Ao início da manhã se observam grandes desvios de produção entre as várias strings. Pelo que se conclui que não deverão ocorrer grandes problemas no momento de arranque de produção.

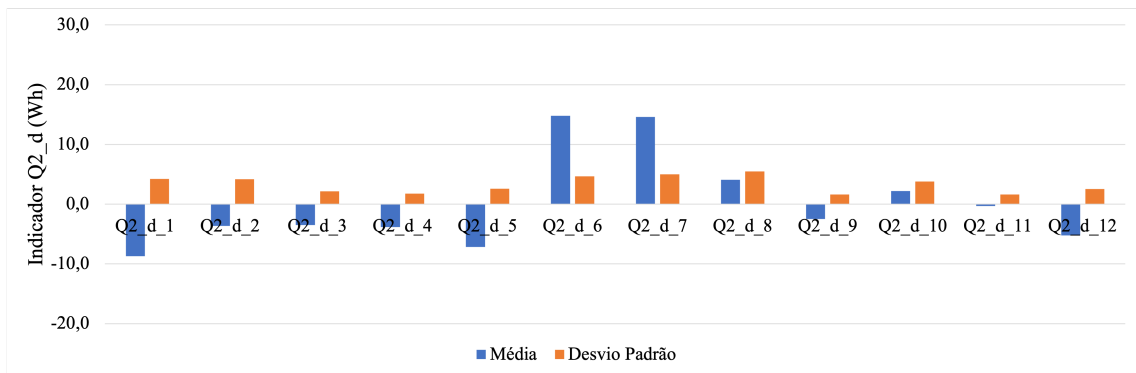


Figura 5.24: Referências de Q2_d para as strings do Q 1.2.7

Ao final da manhã já se verifica que as strings 6 e 7 apresentam valores elevados para os seus indicadores Q2_d. Relativamente ao desvio-padrão, o valor mais alto é o da string 8.

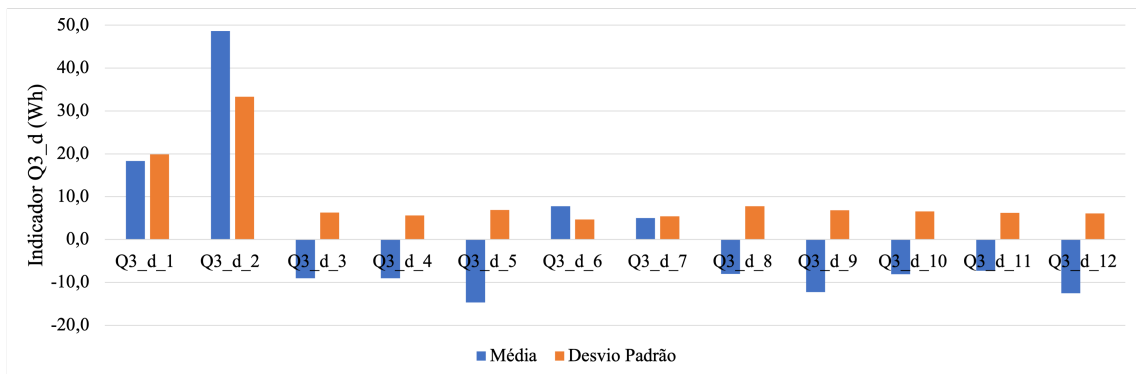


Figura 5.25: Referências de Q3_d para as strings do Q 1.2.7

Na análise do indicador Q3, verifica-se, de forma clara, que as *strings* 1 e 2 se afastam bastante da produção média das *strings* e também apresentam valores elevados de desvio-padrão, o que significa uma grande dispersão dentro dos indicadores dessas *strings*.

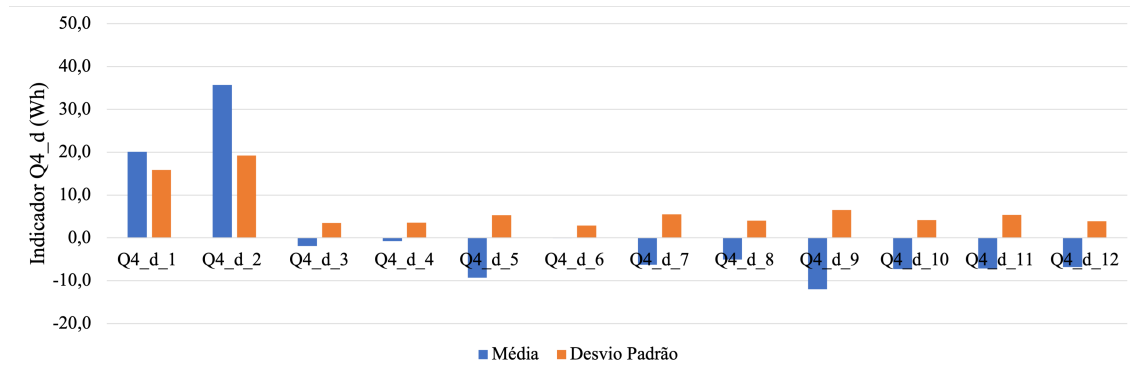


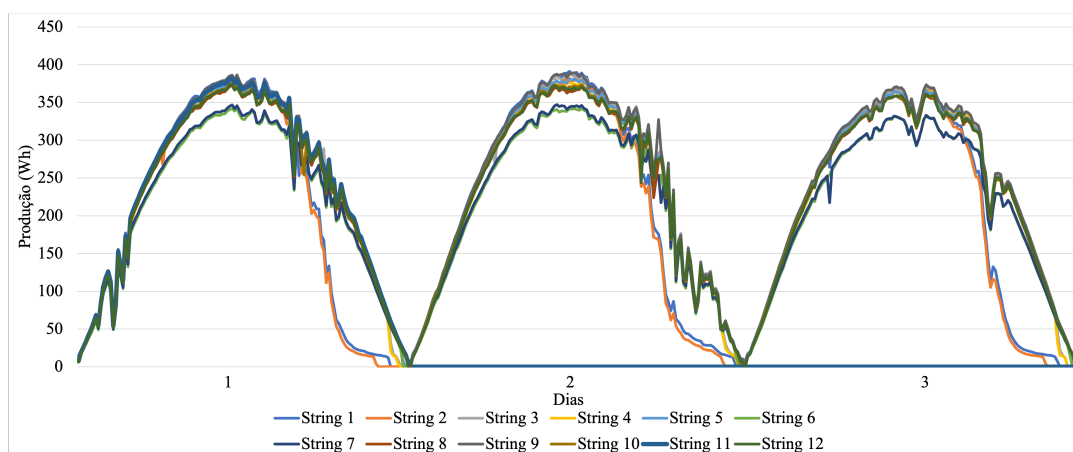
Figura 5.26: Referências de Q4_d para as *strings* do Q 1.2.7

Relativamente ao último momento do dia, representado pelo indicador Q4, constata-se um comportamento idêntico ao observado na Figura 5.25, onde as *strings* 1 e 2 se destacam com uma produção abaixo da média das restantes *strings*.

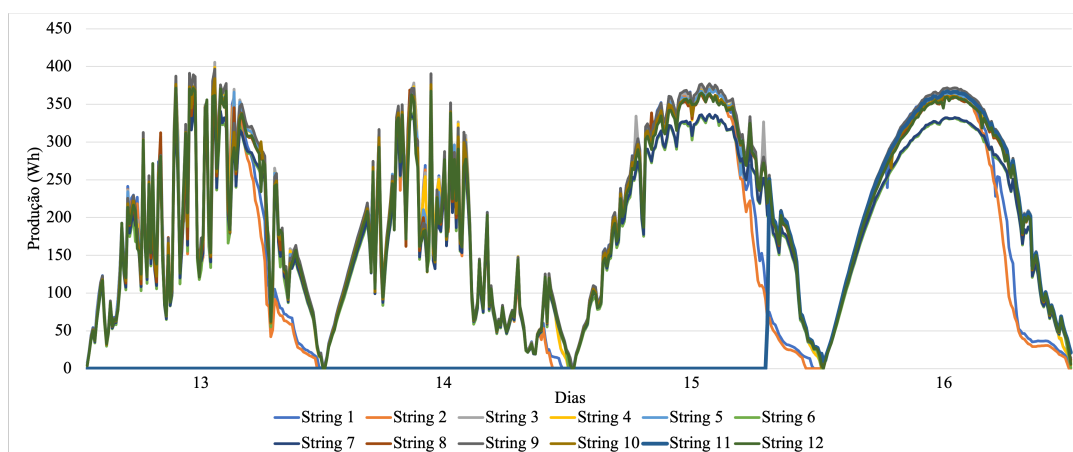
Terminada a análise dos indicadores de desempenho, pode-se dizer que esta vem suportar algumas conclusões já retiradas na Secção 5.3.1- Caracterização Energética. Para os dois quadros de junção em estudo, tinha se observado graficamente que as *strings* 6 e 7 tinham níveis de produção mais baixos que as restantes *strings* e, ao analisar os gráficos anteriores, verificam-se que essas *strings* possuem valores elevados nas suas referências (média e desvio-padrão), para todos os indicadores (Q1, Q2, Q3 e Q4). As *strings* 1 e 2 também exibem valores elevados de referência para os indicadores da parte da tarde (Q3 e Q4). Sabe-se que valores elevados de referência demonstram, à partida, que os elementos se desviam da média de produção.

5.3.2.1 Caso de Falha 1- *Strings* do Quadro de Junção 4.1.2

Na secção 5.3.1, verificou-se uma discrepância de produção no mês de Outubro para a *string* 11 do Q 4.1.2, como tal, será esse o primeiro caso de falha a ser investigado. A Figura 5.27 ilustra a produção das 12 *strings* nos primeiros 3 dias de Outubro e a Figura 5.28 apresentará as mesmas *strings* passadas 2 semanas.

Figura 5.27: Produção das *strings* do Q 4.1.2 no início de Outubro

Verifica-se que, no dia 1/10, a *string* 11 encontra-se a produzir de forma idêntica às restantes *strings*, porém, nos dias a seguir esta *string* não tem qualquer produção de energia solar FV. Relativamente às restantes *strings*, destaca-se o facto das *strings* 1 e 2 deixarem de produzir mais cedo que as restantes e, ainda, o facto das *strings* 6 e 7 estarem sempre a um nível mais abaixo de produção, mas este último caso vai ser avaliado com mais atenção na Secção 5.3.2.2 para uma situação idêntica no Q 1.2.7.

Figura 5.28: Produção das *strings* do Q 4.1.2 a meio de Outubro

Pela análise da Figura 5.28, pode-se concluir que a falha na *string* 11 persistiu até dia 15/10, o que significa que não deve ter sido possível detetar esta falha antes e antecipar assim a sua reparação. Relativamente às *strings* 1 e 2, o comportamento manteve-se, o que revela que pode ser um comportamento típico para aquelas *strings* para o mês de Outubro. Como já se concluiu na Secção 5.3.1, o comportamento das *strings* 1 e 2 pode estar fortemente influenciados pelas sombras que as mesmas sofrem, porque vai variando com os meses do ano.

Importa agora entender se os indicadores desenvolvidos são eficazes a detetar as falhas que foram identificadas graficamente. De forma idêntica aos casos anteriores de falhas nos inversores, optou-se pelo quantil 0,85 para filtrar os indicadores.

A Tabela 5.11 apresenta as principais variações registadas na *string* 11 desde o dia 1, antes da falha, até ao dia 16/10, a nível global.

Tabela 5.11: Análise dos indicadores globais diários da *string* 11

Data	Q1_d_11_glob	Q2_d_11_glob	Q3_d_11_glob	Q4_d_11_glob
01/10/19 19:00	0,36	0,30	0,19	0,19
01/10/19 19:05	0,36	0,30	0,19	0,18
		↓		
02/10/19 08:05	0,75	0,30	0,19	0,18
02/10/19 08:10	0,87	0,30	0,19	0,18
		↓		
02/10/19 09:45	1,00	0,84	0,19	0,18
02/10/19 09:50	1,00	0,90	0,19	0,18
		↓		
02/10/19 13:55	1,00	1,00	0,75	0,18
02/10/19 14:00	1,00	1,00	0,85	0,18
		↓		
02/10/19 17:40	1,00	1,00	1,00	0,84
02/10/19 17:45	1,00	1,00	1,00	0,89
		↓		
02/10/19 18:35	1,00	1,00	1,00	1,00
02/10/19 18:40	1,00	1,00	1,00	1,00
		↓		
16/10/19 15:40	0,37	0,33	0,89	0,27
16/10/19 15:45	0,37	0,33	0,82	0,27

Como já se referiu anteriormente, a entrada em produção desta *string* dá-se no dia 15/10, por volta das 16h. Assim, é espectável que os indicadores diários só estabilizem os seus valores 24h após a intervenção na central, como se comprova pela Tabela 5.11. Observa-se que todos os indicadores globais diários foram capazes de detetar a falha no dia em que esta ocorreu e mantiveram-se num quantil superior a 0,85 de dia 2 até dia 15. No dia 16, à medida que vão entrando os valores do dia os alertas vão-se desligando, conforme a altura em que são calculados, por exemplo, às sete da manhã, antes de começar a produção, o indicador Q1_d_glob assume o quantil de 1,00, porém às nove e meia da manhã já desceu o seu valor para 0,37.

Os indicadores individuais diários da *string* 11 apresentaram um comportamento idêntico ao observado nos indicadores globais diários, mantendo-se com valores elevados desde dia 2 até dia 15, sinalizando assim uma situação de falha. Os valores obtidos para estes indicadores podem ser consultados no Anexo C, na Tabela C.1.

Relativamente aos indicadores semanais, apresenta-se na Tabela 5.12 os valores obtidos para a *string* 11, desde dia 2 a dia 22. Como seria de esperar, os indicadores semanais detetaram esta falha rapidamente uma vez que se tratava de uma falha sistemática, num intervalo de tempo relativamente grande (2 semanas). Os indicadores individuais semanais apresentaram um comportamento semelhante ao representado na Tabela 5.12 para a deteção desta falha.

Tabela 5.12: Análise dos indicadores globais semanais da *string* 11

Data	Q1_s_11_glob	Q2_s_11_glob	Q3_s_11_glob	Q4_s_11_glob
02/10/19 08:10	0,40	0,30	0,18	0,47
02/10/19 08:15	0,43	0,30	0,18	0,47
		↓		
02/10/19 08:45	0,80	0,30	0,18	0,47
02/10/19 08:50	0,85	0,30	0,18	0,47
		↓		
02/10/19 11:30	0,99	0,84	0,18	0,47
02/10/19 11:35	0,99	0,85	0,18	0,47
		↓		
02/10/19 16:20	0,99	1,00	0,84	0,63
02/10/19 16:25	0,99	1,00	0,85	0,63
		↓		
04/10/19 14:40	1,00	1,00	1,00	0,84
04/10/19 14:45	1,00	1,00	1,00	0,85
		↓		
22/10/19 13:30	0,40	0,34	0,86	0,63
22/10/19 13:35	0,40	0,34	0,84	0,63

Tendo em conta tudo o que foi analisado anteriormente, pode-se concluir que o Caso de Falha 1 foi detetado através dos vários indicadores de desempenho desenvolvidos.

5.3.2.2 Caso de Falha 2- Strings do Quadro de Junção 1.2.7

Na Secção 5.3.1, observou-se que as *strings* 6 e 7 do quadro de junção 1.2.7 se encontravam, em vários meses, com uma produção inferior às restantes. No Capítulo 3, ao caracterizar a central em estudo referiu-se que todas as *strings* possuíam 22 módulos FV. Assim, se todas as *strings* possuem o mesmo número de módulos, não é aceitável que algumas estejam sempre em défice de produção.

Apresenta-se, de seguida, um recorte de uns dias de produção do Q 1.2.7, onde é possível observar a discrepância entre as *strings*.

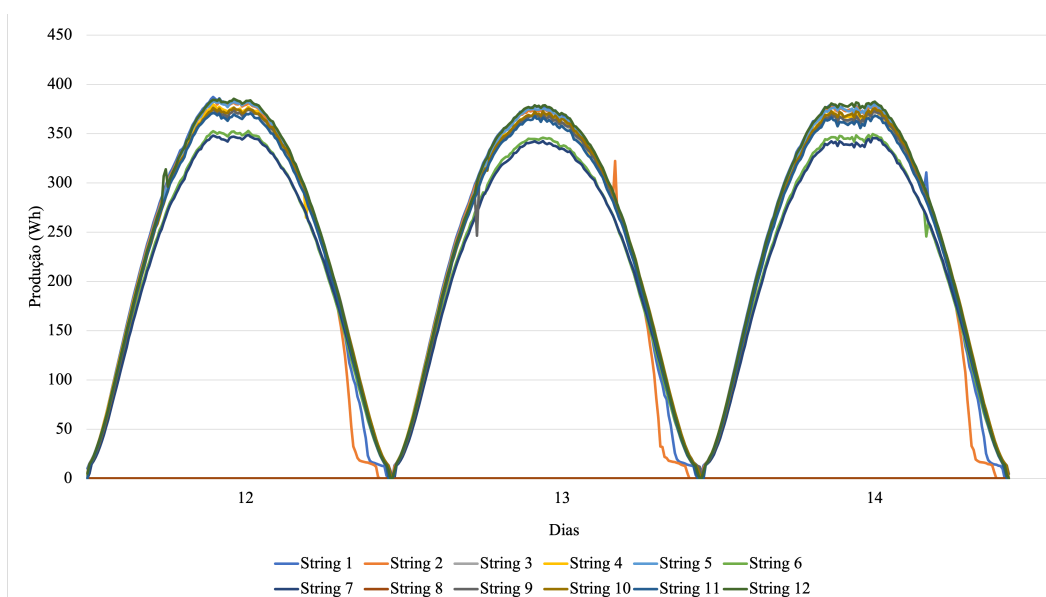


Figura 5.29: Produção das *strings* do Q 1.2.7 entre 12 e 14 de Maio

Analisando o dia 13/5, verifica-se que no pico de produção atingem-se valores na ordem dos 375 Wh, salvo no caso das *strings* 6 e 7, onde o valor é apenas cerca de 340 Wh. Assim, fazendo um rácio entre as produções de pico e o número de painéis de cada *string* consegue-se estimar quantos painéis estão a produzir na *string* de nível mais baixo de produção. Deste modo, vem que:

$$\frac{345,8}{378,4} \times 22 \text{ painéis} \approx 20 \text{ painéis} \quad (5.1)$$

$$\frac{342,4}{378,4} \times 22 \text{ painéis} \approx 20 \text{ painéis} \quad (5.2)$$

A Equação 5.1 diz respeito ao cálculo para a *string* 6 e a Equação 5.2 para a *string* 7. Para o rácio entre as produções considerou-se a *string* 12, dado que era a *string* que estava a produzir mais. Segundo esta aproximação, pode-se então concluir que as *strings* 6 e 7 estão a produzir com cerca de 20 módulos cada uma, existindo, portanto, algum problema em dois módulos dessas *strings*. Neste mês, pode-se observar que a *string* 6 produz ligeiramente mais que a *string* 7 (linha verde acima da azul), como se pode observar nas Figuras 5.29 e 5.30.

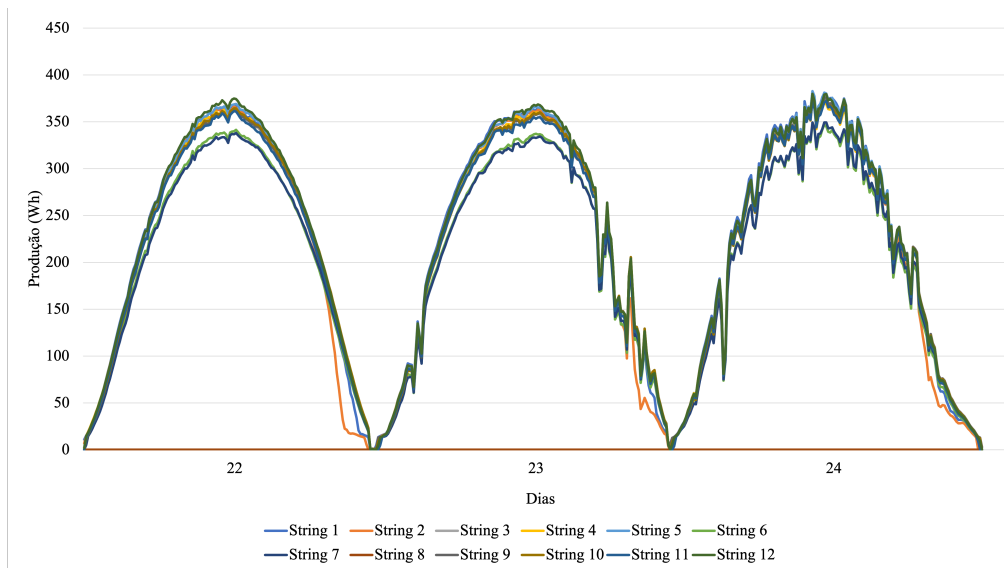


Figura 5.30: Produção das strings do Q 1.2.7 entre 22 e 24 de Maio

Analisando as Figuras 5.29 e 5.30, que são em diferentes momentos de Maio, percebe-se que se trata de um problema sistemático e recorrente também nos outros meses do ano. Importa agora analisar como é que os indicadores de desempenho desenvolvidos se comportam perante esta situação.

Tabela 5.13: Análise dos indicadores globais diários das strings 6 e 7

Data	Indicadores			
12/05/19 13:00	Q1_d_6_glob	Q1_d_7_glob	Q2_d_6_glob	Q2_d_7_glob
	0,89	0,91	0,99	0,97
	Q3_d_6_glob	Q3_d_7_glob	Q4_d_6_glob	Q4_d_7_glob
	0,90	0,85	0,54	0,43
↓				
22/05/19 13:00	Q1_d_6_glob	Q1_d_7_glob	Q2_d_6_glob	Q2_d_7_glob
	0,85	0,99	0,96	0,99
	Q3_d_6_glob	Q3_d_7_glob	Q4_d_6_glob	Q4_d_7_glob
	0,77	0,82	0,50	0,40
↓				
27/05/19 13:00	Q1_d_6_glob	Q1_d_7_glob	Q2_d_6_glob	Q2_d_7_glob
	0,86	0,99	0,97	0,99
	Q3_d_6_glob	Q3_d_7_glob	Q4_d_6_glob	Q4_d_7_glob
	0,85	0,88	0,51	0,42

Tabela 5.14: Análise dos indicadores individuais diários das *strings* 6 e 7

Data	Indicadores			
12/05/19 13:00	Q1_d_6_ind	Q1_d_7_ind	Q2_d_6_ind	Q2_d_7_ind
	0,71	0,65	0,83	0,69
	Q3_d_6_ind	Q3_d_7_ind	Q4_d_6_ind	Q4_d_7_ind
	1,00	0,98	0,77	0,75
↓				
22/05/19 13:00	Q1_d_6_ind	Q1_d_7_ind	Q2_d_6_ind	Q2_d_7_ind
	0,55	0,97	0,59	0,84
	Q3_d_6_ind	Q3_d_7_ind	Q4_d_6_ind	Q4_d_7_ind
	0,78	0,96	0,54	0,67
↓				
27/05/19 13:00	Q1_d_6_ind	Q1_d_7_ind	Q2_d_6_ind	Q2_d_7_ind
	0,61	0,97	0,65	0,87
	Q3_d_6_ind	Q3_d_7_ind	Q4_d_6_ind	Q4_d_7_ind
	0,97	0,99	0,62	0,73

As Tabelas 5.13 e 5.14 analisam os indicadores globais e os indicadores individuais, respetivamente, para 3 dias do mês de Maio de 2019. Observa-se que em termos globais as *strings* 6 e 7 estão constantemente abaixo da média de produção, especialmente na parte da manhã (Q1 e Q2), ao início da tarde (Q3) também se regista este desempenho com alguma frequência. Apenas no indicador do final da tarde (Q4) é que não se verificou nenhuma ocorrência de alerta, estando nesta altura do dia sempre a rondar a média de produção (isto é, em quantis próximos de 0,50).

Em termos individuais, não se registam tantos indicadores acima do quantil de alerta, o que pode ser explicado pelo facto de este comportamento ser recorrente ao longo do ano. Dado que as *strings* 6 e 7 apresentaram durante o ano de 2019 valores quase sempre inferiores às restantes *strings*, a sua referência anual foi obtida tendo em conta esse comportamento. Assim, para as *strings* 6 e 7 é um comportamento típico estar abaixo das restantes. No entanto, continuam a existir alertas nos indicadores individuais, ou seja, há momentos onde se encontram a produzir menos do que era espectável.

Analisam-se, de seguida, para os mesmos dias, os indicadores globais e individuais calculados numa janela semanal, nas Tabelas 5.15 e 5.16, respetivamente.

Tabela 5.15: Análise dos indicadores globais semanais das *strings* 6 e 7

Data	Indicadores			
12/05/19 13:00	Q1_s_6_glob	Q1_s_7_glob	Q2_s_6_glob	Q2_s_7_glob
	0,89	0,98	0,99	0,99
	Q3_s_6_glob	Q3_s_7_glob	Q4_s_6_glob	Q4_s_7_glob
	0,80	0,79	0,52	0,41
↓				
22/05/19 13:00	Q1_s_6_glob	Q1_s_7_glob	Q2_s_6_glob	Q2_s_7_glob
	0,88	0,96	0,98	0,98
	Q3_s_6_glob	Q3_s_7_glob	Q4_s_6_glob	Q4_s_7_glob
	0,77	0,75	0,54	0,43
↓				
27/05/19 13:00	Q1_s_6_glob	Q1_s_7_glob	Q2_s_6_glob	Q2_s_7_glob
	0,89	0,98	0,98	0,99
	Q3_s_6_glob	Q3_s_7_glob	Q4_s_6_glob	Q4_s_7_glob
	0,77	0,77	0,54	0,44

Tabela 5.16: Análise dos indicadores individuais semanais das *strings* 6 e 7

Data	Indicadores			
12/05/19 13:00	Q1_s_6_ind	Q1_s_7_ind	Q2_s_6_ind	Q2_s_7_ind
	0,72	0,98	0,93	0,99
	Q3_s_6_ind	Q3_s_7_ind	Q4_s_6_ind	Q4_s_7_ind
	1,00	1,00	0,68	0,80
↓				
22/05/19 13:00	Q1_s_6_ind	Q1_s_7_ind	Q2_s_6_ind	Q2_s_7_ind
	0,69	0,91	0,77	0,81
	Q3_s_6_ind	Q3_s_7_ind	Q4_s_6_ind	Q4_s_7_ind
	1,00	1,00	0,83	0,86
↓				
27/05/19 13:00	Q1_s_6_ind	Q1_s_7_ind	Q2_s_6_ind	Q2_s_7_ind
	0,73	1,00	0,84	0,98
	Q3_s_6_ind	Q3_s_7_ind	Q4_s_6_ind	Q4_s_7_ind
	1,00	1,00	0,82	0,87

De forma idêntica ao observado na janela diária, os indicadores globais semanais encontram-se frequentemente em quantis superiores a 0,85, em dois momentos do dia: no início e final da manhã. Portanto, as *strings* 6 e 7 apresentam um desempenho mais fraco que os seus pares,

especialmente na parte da manhã.

Relativamente aos indicadores individuais da Tabela 5.16, estes encontram-se em situação de alerta, em alguns momentos do dia. De modo a avaliar os comportamentos destas *strings* 6 e 7, numa janela semanal, apresentam-se, na tabela abaixo, as variações dos indicadores ao longo dos vários meses (apresentados aos pares).

Tabela 5.17: Médias mensais dos indicadores semanais das *strings* 6 e 7

Meses	Q1_s_6	Q1_s_7	Q2_s_6	Q2_s_7	Q3_s_6	Q3_s_7	Q4_s_6	Q4_s_7
1 e 2	2,4	1,4	16,1	12,4	-2,2	-9,1	-2,8	-12,1
3 e 4	4,6	4,4	15,5	14,6	13,0	10,4	1,0	-6,1
5 e 6	3,3	5,8	15,1	17,8	15,1	15,6	1,8	-1,8
7 e 8	4,2	7,1	15,7	19,2	15,9	16,4	1,7	-1,9
9 e 10	2,8	3,4	13,9	14,3	5,6	3,3	-2,7	-9,0
11 e 12	2,0	1,0	11,6	8,0	-1,5	-6,9	-0,6	-7,0
Ref. Anual	3,2	3,9	14,6	14,4	7,6	4,9	-0,3	-6,3

Observa-se que o mês em análise nesta Secção, mês de Maio, corresponde a uma altura do ano em que estas duas *strings* atingiram valores mais altos (de notar que valores mais altos de indicadores correspondem a desvios maiores relativamente à média de produção e estão representados em tons de vermelhos). Assim, é explicado o facto dos indicadores individuais também assumirem, em alguns momentos, quantis superiores a 0,85 nas tabelas anteriores (5.14 e 5.16).

Já se concluiu que para o mês de Maio os indicadores de desempenho desenvolvidos foram capazes de detetar a discrepância de produção das *strings* 6 e 7 relativamente às restantes. Porém, é interessante ver se para um mês onde estas *strings* assumem indicadores mais baixos (assinalados em tons de verde) também se consegue identificar esta diferença e, deste modo, escolheu-se o mês de Novembro para analisar.

Tabela 5.18: Análise dos indicadores semanais das *strings* 6 e 7 no dia 14/11/2019

Análise Individual		Análise Global	
Q1_s_6_ind	0,20	Q1_s_6_glob	0,79
Q1_s_7_ind	0,01	Q1_s_7_glob	0,67
Q2_s_6_ind	0,48	Q2_s_6_glob	0,96
Q2_s_7_ind	0,01	Q2_s_7_glob	0,86
Q3_s_6_ind	0,00	Q3_s_6_glob	0,50
Q3_s_7_ind	0,00	Q3_s_7_glob	0,37
Q4_s_6_ind	0,04	Q4_s_6_glob	0,41
Q4_s_7_ind	0,09	Q4_s_7_glob	0,23

A Tabela 5.18 vem comprovar a importância da análise dos indicadores globais, porque, como se observa na Figura 5.31, as *strings* 6 e 7 mantêm as suas produções abaixo das restantes, porém os seus indicadores individuais encontram-se em quantis inferiores a 0,5, o que significa que em termos de desempenho individual encontram-se ligeiramente melhores que a sua referência. Contudo, em termos globais continuam a estar piores que as restantes *strings* no momento do final da manhã (Q2).

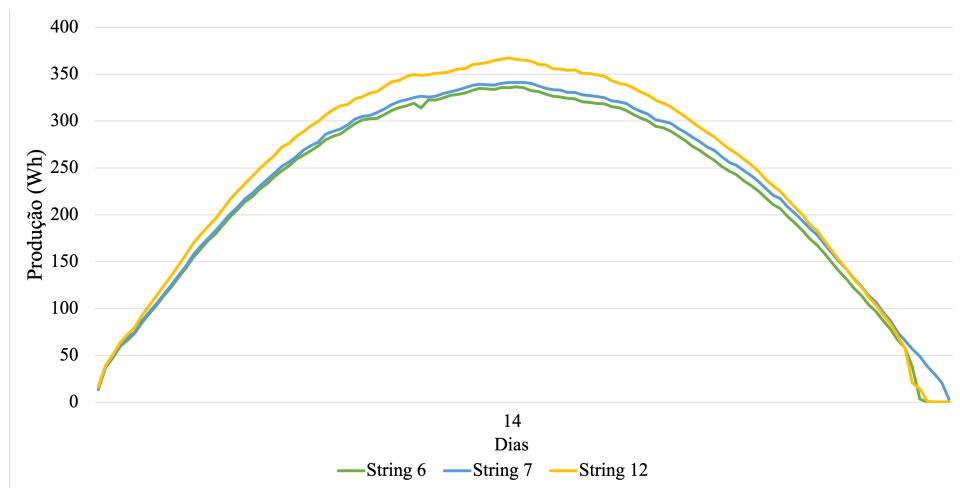


Figura 5.31: Produção das *strings* 6,7 e 12 no dia 14/11/2019

Conclui-se, então, que os indicadores de desempenho desenvolvidos foram capazes de sinalizar esta falha nas *strings* 6 e 7. Também foi demonstrada a utilidade dos diversos indicadores e como é essencial analisar todos em simultâneo.

5.4 Discussão dos Resultados

Após analisar os diversos casos de falha, tanto ao nível dos inversores como ao nível das *strings*, foi possível retirar algumas conclusões acerca dos indicadores de desempenho desenvolvidos.

A Tabela 5.19 resume as ilações retiradas, onde "VA" indica o Valor de Alerta que pode ser estabelecido pelo operador da central, nos casos analisados considerou-se o valor de 0,85.

Tabela 5.19: Caracterização das falhas através da avaliação dos indicadores de desempenho

Janela temporal	Indicador Global	Indicador Individual	Tipo de Falha
Diária	<VA	<VA	-
	<VA	>VA	Suspeita de falha, deve-se continuar alerta e analisar janela semanal
	>VA	<VA	Não deve existir falha, o elemento pode ter um desempenho inferior ao dos seus pares temporariamente
	>VA	>VA	Falha repentina e de curta duração
Semanal	<VA	<VA	-
	<VA	>VA	Suspeita de falha, deve-se avaliar o elemento que apresenta estes indicadores
	>VA	<VA	Suspeita de falha, elemento desempenha-se sistematicamente abaixo dos seus pares, deve ser avaliado
	>VA	>VA	Falha sistemática e de longa duração ou falha de curta duração, mas de grande intensidade

Para completar a caracterização das falhas, importa também analisar qual dos indicadores horários ficou em alerta: se foi ao início da manhã (Q1), ao final da manhã (Q2), ao início da tarde (Q3) ou então ao final do dia (Q4). Através da abordagem horária e da análise da Tabela 5.19, reúnem-se as condições necessárias para caracterizar com algum detalhe as falhas que ocorrem na central FV.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões finais acerca do trabalho desenvolvido e ainda algumas indicações para futuras aplicações da ferramenta.

6.1 Conclusões

O crescimento acentuado da energia solar fotovoltaica tem despoletado cada vez mais o interesse no controlo de qualidade da produção. As empresas que possuem parques FV nos seus portfólios pretendem operá-los e monitorizá-los de forma contínua, com o objetivo de maximizar o desempenho da central.

A presente dissertação propôs-se a desenvolver uma ferramenta de cálculo de indicadores de desempenho de centrais FV, de modo a monitorizar em continuidade o desvio de produção real relativamente a um valor de referência. Para avaliar o desempenho de produções é, então, necessário realizar uma comparação com um valor de referência, o qual pode ser resultado de valores reais medidos ou de uma simulação. Os valores simulados são tipicamente usados para situações onde não existem valores reais suficientes ou caso seja para uma fase de projeto da central e ainda não existam dados.

Assim, na presente dissertação, optou-se por trabalhar com valores reais medidos, uma vez que existia uma grande quantidade de informação. Relativamente aos valores medidos, escolheram-se as seguintes alternativas: medições relativamente a equipamentos semelhantes (referência global), nas mesmas condições, e medições do próprio equipamento (referência individual). Também podem existir referências de valores medidos através de medições de variáveis indiretas, por exemplo, através de variáveis meteorológicas medidas, como a irradiância e a temperatura, pode-se estimar a produção. Porém, esta última opção foi descartada uma vez que é mais suscetível a erros, sejam eles na própria medição de meteorologia ou também erros na aproximação do modelo de estimativa.

De modo a avaliar os desvios de produção relativamente aos valores de referência, sentiu-se a necessidade de repartir o dia em diferentes momentos, dado que, ao longo do dia, existem características específicas da operação da central. Por exemplo, os inversores têm períodos de arranque,

ao início do dia, e períodos de desligar, ao final do dia, onde ocorrem usualmente algumas avarias. A abordagem de repartir o dia também foi seguida por uma questão de escalas dos desvios, uma vez que os desvios ao início da manhã e ao final da tarde são tipicamente inferiores aos registados durante o resto do dia. Outra vantagem desta divisão, passa pela avaliação dos efeitos de sombras, dado que estes variam com a posição do sol, torna-se, assim, possível entender as horas do dia em que existem estes problemas e como é que estes afetam as produções. Deste modo, optou-se por desenvolver um conjunto de indicadores de forma repartida: ao início da manhã (indicador Q1), ao fim da manhã (Q2), ao início da tarde (Q3) e, por último, ao final do dia (Q4).

Recorreu-se a uma análise de duas janelas temporais: janela diária e janela semanal. Foi através de médias móveis sob os desvios registados que se aplicaram estas janelas temporais. Portanto, para a média móvel semanal, desvios de pequena magnitude são diluídos, já na média móvel diária, esses desvios pequenos são significantes, uma vez que são calculados para uma janela de tempo mais curta. As janelas temporais utilizadas demonstraram-se como uma vantagem para a caracterização das falhas, quando analisadas em simultâneo. O indicador diário revelou-se eficiente a sinalizar falhas temporárias/curta duração, por sua vez, o indicador semanal foi útil para indicar falhas persistentes/sistemáticas ou então para falhas temporárias, mas de grande magnitude.

Os indicadores utilizados para avaliar o desempenho de produção resultam, então, da combinação dos quatro aspetos anteriormente referidos: referências através de valores reais medidos, divisão do dia em 4 momentos, médias móveis sob os desvios numa janela diária e médias móveis sob os desvios numa janela semanal. Relativamente à referência, os indicadores dividem-se, ainda, conforme a referência que utilizavam no seu cálculo: referência individual (indicador individual) ou referência global (indicador global). Os indicadores de desempenho individuais e globais são obtidos através de uma análise de quantis do desvio do desempenho, ou seja, os valores dos indicadores resultam de uma análise estatística. Deste modo, as informações sobre o desempenho do sistema acabam por ser apresentadas de uma forma muito intuitiva, variando sempre entre 0 e 1. Sendo que valores elevados correspondem a situações de desempenho abaixo da média e valores baixos representam situações de desempenho acima da média.

O algoritmo desenvolvido torna possível uma verificação de situação de alerta nos valores dos indicadores calculados, permitindo ao operador da central filtrar as ocorrências mais drásticas, isto é, só se entra em situação de alerta a partir de um determinado valor imposto, designado por Valor de Alerta (VA). A definição deste limite condiciona a certeza que se tem na ocorrência de avaria ou não.

Tendo em conta os resultados obtidos no processo de simulação de funcionamento da ferramenta, pode-se concluir que a metodologia implementada foi eficaz a detetar falhas que ocorreram na central FV, no ano de 2019. Através da análise do comportamento dos indicadores nas situações de falhas, foi possível caracterizar e tipificar as falhas que ocorrem na operação de uma central FV. Começando pela análise diária, se ambos os indicadores diário individual e diário global estiverem acima de VA, pode-se concluir que se está perante uma falha temporária e de curta duração. Se na janela diária, apenas estiver acima de VA o indicador individual, existe uma suspeita de falha,

mas o aconselhado é analisar a janela semanal, para entender se é algo recorrente. Relativamente à análise da janela semanal, se ambos os indicadores semanal individual e semanal global estiverem num quantil superior ao quantil de alerta, pode-se afirmar a existência de uma falha sistemática e de longa duração ou, também, uma falha de curta duração, mas de grande intensidade. Para a janela semanal, basta um dos indicadores, individual ou global, estar com um valor acima de VA para existir a suspeita de falha.

Através da observação da frequência e da duração das falhas detetadas, concluiu-se que as falhas ao nível dos inversores eram mais rapidamente detetadas e reparadas, devido aos sistemas de monitorização instalados nesses equipamentos, já ao nível das *strings*, era mais complicado detetar e intervir num curto espaço de tempo. Foi neste sentido que a ferramenta desenvolvida se revelou uma mais valia para a monitorização do parque FV, uma vez que detetava as falhas tanto ao nível dos inversores como ao nível das *strings*.

Com a ferramenta desenvolvida para o cálculo dos indicadores de desempenho, conclui-se que as empresas que possuem parques solares FV são capazes de monitorizar, com bastante detalhe, o seu desempenho de forma contínua. Assim, torna-se possível corrigir atempadamente as falhas detetadas, sendo um benefício para a exploração da central.

6.2 Respostas às Questões de Investigação

A presente dissertação propôs-se a dar resposta a algumas Questões de Investigação ao longo do seu desenvolvimento. Nesta secção, irá apresentar-se a questão colocada e a respetiva resposta.

Que tipo de metodologias, detalhe de informação e indicadores são usados e quais são os mais apropriados para a avaliação de desempenho, nos diversos momentos da avaliação?

No Capítulo 2, onde se realizou uma revisão bibliográfica do tema da dissertação, encontraram-se as metodologias usadas para a deteção de falhas: deteção visual e deteção automática, sendo esta última a mais interessante e utilizada para avaliação de desempenho. Existem várias metodologias com diversos tipos de informação para a análise automática, mas as mais solicitadas incluem métodos baseados em dados e foi nesse sentido que a presente dissertação se focou. Quanto aos diversos momentos de avaliação, também foram mencionados no Estado da Arte, são eles: PAC, FAC e O&M, sendo que nesta dissertação, como se tratava de uma central já em operação, a metodologia foi desenvolvida para uma avaliação contínua do desempenho, com base em medidas reais. Para avaliações na entrega da instalação e para avaliações após o período de garantia, aconselha-se o uso de indicadores com base em valores simulados, uma vez que não existem dados ou então são insuficientes para uma boa aproximação.

Quais os benefícios energéticos e económicos que podem ser conseguidos com a análise de desempenho?

A metodologia implementada consistiu no desenvolvimento de indicadores de desempenho para monitorizar em continuidade o desvio de produção real relativamente a um valor de referência. Ao avaliar o desvio é possível conhecer as perdas energéticas que ocorreram nos diferentes equipamentos da central. No Capítulo 5, foi apresentada uma caracterização energética ao nível dos inversores e é possível concluir que relativamente aos valores máximos de cada mês está-se a perder cerca de 1% de energia ao ano. Assim, assumindo um valor de 50 €/MWh, perde-se cerca de 4 000 € ao ano devido a desempenhos abaixo do máximo esperado.

Que nível de automatização se pode conseguir com as análises de desempenho automatizadas?

Para a metodologia implementada pode-se afirmar que o nível de automatização é bastante elevado, todavia é sempre necessária a definição de um *trade-off* para o valor a partir do qual se identifica uma falha e se despoleta, consequentemente, um alarme. Portanto, é necessária uma avaliação humana por parte do operador da central para a deteção de falhas, ou seja, não é totalmente automatizado o processo. Ao longo da dissertação, tentou-se caracterizar o tipo de falha consoante o comportamento dos indicadores (Tabela 5.19), no entanto, para uma correta identificação e caracterização das falhas era necessário a existência de registos de operação no terreno da central, onde se identificasse a relação entre o tipo de falha e o indicador. Através desses registos, poderia entrar-se noutra nível de automatização onde se treinavam sistemas de *Machine Learning* para caracterizar automaticamente as falhas.

Qual a dificuldade técnica e custos de implementação de sistemas automatizados de análise de desempenho?

As dificuldades técnicas para implementação desta metodologia passam, essencialmente, por ter um número considerável de medidas reais e suficientes equipamentos semelhantes para se estabelecerem comparações. Outra dificuldade técnica está relacionada com as janelas temporais, porque conseguem-se detetar anomalias imediatas, mas para dias muito nublados pode tornar-se muito difícil essa deteção, dado que o desvio não fica tão evidente e existe, assim, alguma incerteza. De modo a solucionar o problema anterior, alargou-se a janela de monitorização para uma semana, o que implica um atraso até ao momento da interação. Portanto, conclui-se que uma dificuldade técnica passa por existir sempre um atraso da resposta quanto mais segura se pretender essa resposta. Outra dificuldade técnica consiste na monitorização de uma elevada quantidade de indicadores, pelo que requer bastante processamento de dados e uma grande quantidade de registos. Uma outra dificuldade técnica encontrada foi ao nível das medições, podendo existir falhas de informação ou então medidas erradas. Para terminar a exposição das dificuldades técnicas, importa referir o facto das centrais FV poderem ter uma constituição diferente daquela onde foi desenvolvida a metodologia, assim, tornou-se complicado criar uma ferramenta que fosse aplicável a todo o tipo de centrais.

Quanto aos custos de implementação, podem ser ao nível dos sistemas de monitorização para medir variáveis elétricas (potências, tensões, etc.) e podem existir também sistemas de monitorização de variáveis meteorológicas. Portanto, existem, essencialmente, custos nas medições, custos para as comunicações e armazenamento de dados num centro de controlo e, ainda, custos associados ao *software* que está no centro de controlo, que é onde vai estar implementada a metodologia desenvolvida nesta dissertação. Não fazia parte do âmbito da dissertação avaliar estes custos em euros, porém pode-se afirmar que estas componentes serão significativas para o custo do projeto do sistema FV.

6.3 Futura Utilização do Trabalho Realizado

Após o desenvolvimento da ferramenta de cálculo de indicadores de desempenho para uma central FV, é importante deixar algumas indicações para futuramente se aplicar a ferramenta. É importante esclarecer que as centrais fotovoltaicas assumem estruturas e configurações diferentes e até mesmo a disponibilidade dos valores de referência pode ser diferente. Deste modo, para aplicar a metodologia desenvolvida a outras centrais, é necessário ter em consideração os seguintes tópicos:

- Implementar um sistema de informação na central que receba as produções, em intervalos de 5 minutos;
- Estruturar os dados em cascata, tendo em conta o *layout* e interligação dos equipamentos;
- Definir os valores de referência, podem ser através de uma simulação de produção ou através de valores reais medidos;
- Realizar a sequência de cálculos do fluxograma 4.1, de modo a retirar os indicadores permanentemente;
- Mecanismo de identificação da falha com base nos valores dos indicadores.

Após as especificações anteriores, importa que exista uma sincronização entre os indicadores calculados e os registos do operador no terreno, ou seja, o objetivo passa por conseguir um registo das falhas que foram acontecendo na central. Através desses registos pode-se treinar uma rede neuronal de forma supervisionada, para que, mais tarde, se possa recorrer a um sistema de inteligência artificial para identificar automaticamente o tipo de falha, consoante o comportamento dos indicadores.

Para terminar, é também vantajoso adicionar um *reset* nas médias móveis após a reparação de uma avaria, ou seja, excluir os dados que possuíam anomalias do cálculo dos próximos indicadores. Por exemplo, se ocorrer uma avaria no inversor a uma segunda-feira e esta seja reparada logo no dia a seguir, deveriam excluir-se os dados de segunda-feira e de terça-feira da análise, porque se não, nos dias a seguir, especialmente na janela semanal, poderão ocorrer sinais de alerta desnecessariamente.

Anexo A

Indicadores de Desempenho dos Inversores

A.1 Janela Diária

As Tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 apresentam os valores obtidos para os indicadores Q1_d, Q2_d, Q3_d e Q4_d, respectivamente. A Tabela A.5 apresenta os desvios-padrões dos indicadores mencionados anteriormente.

Tabela A.1: Análise mensal do indicador Q1_d para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.
1	-8,07	4,47	2,80	1,33	3,76	2,30	1,51	1,36
2	-5,42	4,29	2,71	2,68	2,07	1,40	0,63	2,93
3	-4,72	3,21	5,41	3,97	3,42	2,11	-4,11	2,72
4	-3,72	2,14	3,10	1,73	3,84	2,15	-3,22	1,88
5	-4,51	2,10	4,51	1,55	4,82	2,08	-4,83	1,62
6	-4,89	2,18	4,58	1,65	5,21	2,13	-4,90	1,89
7	-8,10	10,55	2,45	9,73	3,23	9,49	2,42	29,21
8	-4,96	2,04	4,80	1,52	5,45	1,74	-5,29	1,68
9	-4,62	1,90	4,78	1,42	4,24	1,26	-4,40	1,39
10	-3,70	2,35	3,47	2,44	1,96	1,25	-1,73	2,06
11	-3,97	3,92	1,09	1,48	1,85	1,63	1,03	2,08
12	-4,67	4,76	1,68	1,68	2,84	2,82	0,15	0,71
Ref. anual	-5,11	3,66	3,45	2,60	3,56	2,53	-1,90	4,13

Tabela A.2: Análise mensal do indicador Q2_d para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.
1	-4,29	6,08	6,14	3,31	-4,96	2,62	3,10	4,52
2	-3,38	12,92	8,15	5,91	-3,90	4,64	-0,87	6,81
3	-4,93	8,15	10,93	9,29	-1,59	5,98	-4,42	8,40
4	-9,31	28,14	-3,78	30,10	7,69	25,35	5,39	33,33
5	-1,94	3,59	6,98	2,11	-0,39	1,30	-4,64	3,06
6	-3,01	4,02	7,01	2,76	0,08	1,59	-4,08	3,01
7	-9,36	24,46	0,66	25,40	-6,79	25,29	15,49	73,39
8	-2,10	2,58	8,13	2,19	-0,40	1,19	-5,63	1,67
9	-1,39	6,45	9,00	3,86	-2,15	2,59	-5,46	2,75
10	-1,50	3,93	8,72	4,84	-3,30	2,31	-3,92	3,86
11	-2,25	3,74	3,47	3,70	-1,37	2,03	0,15	3,16
12	-1,70	6,13	2,97	2,78	-1,67	2,35	0,41	6,06
Ref. anual	-3,76	9,18	5,70	8,02	-1,56	6,44	-0,37	12,50

Tabela A.3: Análise mensal do indicador Q3_d para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.
1	2,35	9,06	-3,22	4,06	-9,77	4,60	10,64	7,50
2	4,40	8,67	-0,61	4,51	-9,96	5,03	6,17	4,26
3	4,20	9,21	1,43	8,75	-10,68	9,02	5,05	8,80
4	-6,42	40,04	-10,03	39,92	4,20	43,07	12,26	37,11
5	4,81	1,99	1,05	1,48	-9,27	2,96	3,42	2,14
6	3,01	4,67	1,35	2,74	-7,52	3,31	3,17	2,51
7	2,01	10,17	-1,65	8,78	-11,17	9,10	10,80	27,76
8	4,84	1,79	1,55	1,66	-9,59	1,46	3,20	2,20
9	6,35	5,64	1,27	2,60	-10,51	3,27	2,89	3,26
10	4,00	3,46	1,82	2,66	-8,63	4,83	2,81	3,36
11	1,50	3,61	-0,66	2,34	-4,59	4,59	3,75	4,67
12	0,34	2,65	-2,45	3,02	-3,98	3,12	6,09	6,85
Ref. anual	2,62	8,41	-0,85	6,88	-7,62	7,86	5,85	9,20

Tabela A.4: Análise mensal do indicador Q4_d para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.	Média	Des. Pad.
1	1,03	1,15	-1,91	1,44	-3,50	2,05	4,37	2,71
2	1,46	1,74	-1,89	1,47	-3,63	2,14	4,06	2,91
3	3,11	2,66	-1,90	3,55	-6,30	3,58	5,08	3,41
4	3,56	2,46	-3,41	2,54	-5,17	3,34	5,03	3,86
5	6,43	2,08	-4,88	1,82	-8,76	2,69	7,21	2,61
6	7,08	2,92	-4,66	1,89	-9,20	2,42	6,78	2,57
7	7,68	1,16	-5,69	1,03	-9,82	1,25	7,83	1,36
8	6,04	1,73	-5,63	1,17	-8,75	1,95	8,33	1,51
9	4,13	1,77	-3,55	1,86	-6,75	2,39	6,18	2,95
10	2,95	3,18	-3,60	3,14	-6,43	4,42	7,08	5,73
11	1,05	1,51	-1,86	1,99	-2,41	2,06	3,22	3,66
12	0,64	0,58	-0,95	1,01	-1,51	1,64	1,83	2,18
Ref. anual	3,76	1,91	-3,33	1,91	-6,02	2,49	5,58	2,96

Tabela A.5: Análise global dos desvios-padrões dos indicadores Q1_d, Q2_d, Q3_d e Q4_d

Mês	Desvio Q1_d	Desvio Q2_d	Desvio Q3_d	Desvio Q4_d
1	5,44	6,43	10,01	3,57
2	4,40	9,53	8,60	3,66
3	5,43	10,31	10,95	5,54
4	4,01	30,17	41,04	5,36
5	5,03	5,07	5,94	7,34
6	5,28	5,25	5,57	7,53
7	17,59	43,71	17,90	7,98
8	5,42	5,43	5,94	7,49
9	4,76	6,86	7,43	5,80
10	3,53	6,39	6,23	6,81
11	3,39	3,90	4,98	3,34
12	4,08	5,06	5,74	1,99
REF anual	5,70	11,51	10,86	5,53

A.2 Janela Semanal

As Tabelas A.6, A.7, A.8 e A.9 apresentam os valores obtidos para os indicadores Q1_s, Q2_s, Q3_s e Q4_s, respetivamente. A Tabela A.10 apresenta os desvios-padrões dos indicadores mencionados anteriormente.

Tabela A.6: Análise mensal do indicador Q1_s para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	-8,33	2,38	2,83	0,59	3,85	1,59	1,65	0,45
2	-5,11	1,80	2,34	1,33	1,90	0,56	0,87	1,24
3	-5,10	1,74	6,13	2,62	3,61	1,01	-4,65	1,79
4	-3,63	0,60	2,96	0,48	3,75	0,66	-3,08	0,59
5	-4,38	0,82	4,45	0,68	4,69	0,89	-4,76	0,82
6	-4,95	0,83	4,54	0,81	5,21	0,76	-4,80	0,98
7	-7,33	5,02	3,06	4,12	3,81	3,92	0,46	12,95
8	-5,00	0,76	4,79	0,71	5,43	0,82	-5,22	0,80
9	-4,53	1,28	4,70	0,60	4,12	0,78	-4,29	0,72
10	-3,69	0,75	3,26	1,34	1,87	0,47	-1,44	1,16
11	-3,97	1,33	1,10	0,38	1,81	0,39	1,07	0,75
12	-3,85	3,07	1,33	1,09	2,37	1,67	0,15	0,43
REF anual	-4,99	1,70	3,46	1,23	3,53	1,13	-2,00	1,89

Tabela A.7: Análise mensal do indicador Q2_s para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	-4,62	2,85	6,35	0,92	-4,88	0,78	3,14	2,62
2	-4,50	5,25	8,20	2,37	-3,60	2,28	-0,10	2,57
3	-5,40	5,01	11,99	5,29	-1,84	3,61	-4,74	2,55
4	-2,93	5,83	2,57	6,48	1,91	5,24	-1,54	7,02
5	-1,41	1,17	6,77	0,86	-0,57	0,51	-4,79	0,68
6	-3,13	1,97	7,23	1,31	0,19	0,76	-4,29	1,11
7	-7,27	6,96	3,59	8,18	-4,37	7,29	8,06	21,64
8	-1,81	1,16	8,02	0,75	-0,49	0,48	-5,71	0,60
9	-0,83	2,22	8,59	1,43	-2,32	1,00	-5,44	1,38
10	-1,82	1,27	8,94	2,69	-3,23	1,17	-3,90	0,91
11	-2,32	1,09	3,51	1,65	-1,49	0,80	0,30	0,71
12	-1,17	2,55	2,72	1,50	-1,59	1,15	0,04	2,39
REF anual	-3,10	3,11	6,54	2,79	-1,86	2,09	-1,58	3,68

Tabela A.8: Análise mensal do indicador Q3_s para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	2,63	2,37	-3,88	1,62	-10,20	1,34	11,46	2,46
2	3,87	3,92	-0,30	2,66	-9,80	2,02	6,23	1,66
3	4,60	5,72	1,89	4,50	-11,48	5,93	5,00	3,55
4	1,28	6,86	-2,34	6,67	-3,58	6,88	4,63	6,62
5	5,08	0,46	1,14	0,57	-9,51	0,72	3,28	0,69
6	2,96	2,78	1,74	1,35	-7,97	1,44	3,27	1,06
7	2,21	4,28	-1,13	3,58	-10,67	3,78	9,59	11,57
8	5,14	0,71	1,59	0,73	-9,69	0,69	2,96	0,91
9	6,69	2,31	1,01	0,85	-10,26	1,35	2,56	1,39
10	3,51	0,92	1,85	2,21	-8,38	1,59	3,03	1,39
11	1,87	1,70	-0,82	1,17	-5,15	2,48	4,11	1,76
12	0,63	0,75	-2,21	1,16	-3,71	1,70	5,29	3,24
REF anual	3,37	2,73	-0,12	2,26	-8,37	2,49	5,12	3,03

Tabela A.9: Análise mensal do indicador Q4_s para os quatro inversores

Mês	Inversor 1		Inversor 2		Inversor 3		Inversor 4	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	1,06	0,29	-2,20	0,51	-3,83	0,51	4,97	0,96
2	1,42	0,55	-1,91	0,83	-3,63	0,75	4,12	1,18
3	3,44	1,95	-1,99	2,10	-6,99	2,52	5,55	1,71
4	3,36	0,88	-3,29	0,89	-5,00	1,29	4,92	1,32
5	6,38	0,89	-4,73	0,50	-8,62	0,95	6,97	0,79
6	6,79	1,84	-4,46	0,94	-9,03	1,31	6,70	0,92
7	7,42	0,53	-5,51	0,46	-9,57	0,58	7,65	0,57
8	6,06	1,12	-5,68	0,59	-8,84	1,26	8,45	0,80
9	3,94	0,65	-3,30	0,90	-6,33	0,83	5,69	1,73
10	2,61	1,75	-3,72	0,96	-6,60	2,06	7,72	1,61
11	1,14	0,39	-2,06	1,08	-2,60	0,97	3,52	1,83
12	0,63	0,21	-0,87	0,44	-1,34	0,73	1,58	1,02
REF anual	3,69	0,92	-3,31	0,85	-6,03	1,15	5,65	1,20

Tabela A.10: Análise global dos desvios-padrões dos indicadores Q1_s, Q2_s, Q3_s e Q4_s

Mês	Desvio Q1_s	Desvio Q2_s	Desvio Q3_s	Desvio Q4_s
1	5,09	5,29	8,27	3,42
2	3,27	6,03	6,69	3,11
3	5,30	8,24	8,40	5,32
4	3,42	6,59	7,49	4,37
5	4,64	4,30	5,70	6,87
6	4,95	4,69	4,97	7,06
7	8,70	14,02	9,89	7,69
8	5,17	5,07	5,79	7,46
9	4,50	5,46	6,47	5,09
10	2,90	5,48	5,13	5,80
11	2,45	2,50	3,91	2,75
12	2,99	2,60	3,95	1,35
REF anual	4,45	5,86	6,39	5,02

Anexo B

Indicadores de Desempenho das *Strings*

B.1 Janela Diária

As Tabelas [B.1](#) e [B.2](#) apresentam as referências do ano de 2019 para o cálculo dos indicadores diários das *strings* do quadro de junção 4.1.2. e 1.2.7, respectivamente.

Tabela B.1: Referências anuais para os indicadores diários do quadro 4.1.2

Indicador	Ref. Anual Média	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_d_1	-3,64	1,79
Q1_d_2	0,35	1,66
Q1_d_3	-0,90	1,56
Q1_d_4	0,76	1,59
Q1_d_5	-1,99	1,50
Q1_d_6	4,70	2,36
Q1_d_7	2,29	1,70
Q1_d_8	-0,11	1,61
Q1_d_9	-2,46	1,66
Q1_d_10	0,76	1,72
Q1_d_11	0,29	4,51
Q1_d_12	-0,04	1,10
Q2_d_1	-8,80	4,37
Q2_d_2	-4,10	3,81
Q2_d_3	-6,08	3,42
Q2_d_4	-3,33	2,45
Q2_d_5	-4,80	3,09
Q2_d_6	19,44	7,37
Q2_d_7	16,77	6,25
Q2_d_8	-0,80	4,73
Q2_d_9	-9,06	4,11
Q2_d_10	-1,08	3,54
Q2_d_11	3,34	18,81
Q2_d_12	-1,50	3,26
Q3_d_1	12,52	13,28
Q3_d_2	34,64	17,24
Q3_d_3	-13,66	6,30
Q3_d_4	-11,11	5,05
Q3_d_5	-10,47	5,52
Q3_d_6	14,05	5,67
Q3_d_7	12,26	4,98
Q3_d_8	-6,23	5,43
Q3_d_9	-14,82	6,50
Q3_d_10	-6,48	5,04
Q3_d_11	-2,96	20,75
Q3_d_12	-7,73	4,97
Q4_d_1	23,63	19,94
Q4_d_2	45,18	21,10
Q4_d_3	-9,89	5,09
Q4_d_4	-8,00	3,85
Q4_d_5	-10,10	5,54
Q4_d_6	-0,22	2,91
Q4_d_7	-3,08	4,45
Q4_d_8	-5,95	3,95
Q4_d_9	-10,95	6,00
Q4_d_10	-5,14	4,05
Q4_d_11	-8,31	9,36
Q4_d_12	-7,18	4,17

Tabela B.2: Referências anuais para os indicadores diários do quadro 1.2.7

Indicador	Ref. Anual Média	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_d_1	-4,26	2,03
Q1_d_2	-2,72	1,77
Q1_d_3	-1,49	1,15
Q1_d_4	-2,52	1,12
Q1_d_5	-1,49	0,88
Q1_d_6	3,50	1,42
Q1_d_7	4,18	2,00
Q1_d_8	4,81	3,44
Q1_d_9	-0,35	0,93
Q1_d_10	2,64	2,68
Q1_d_11	-0,10	0,75
Q1_d_12	-1,39	1,03
Q2_d_1	-8,70	4,21
Q2_d_2	-3,66	4,19
Q2_d_3	-3,52	2,14
Q2_d_4	-3,83	1,76
Q2_d_5	-7,19	2,58
Q2_d_6	14,78	4,67
Q2_d_7	14,60	5,00
Q2_d_8	4,07	5,50
Q2_d_9	-2,50	1,64
Q2_d_10	2,19	3,80
Q2_d_11	-0,32	1,63
Q2_d_12	-5,23	2,53
Q3_d_1	18,33	19,87
Q3_d_2	48,68	33,34
Q3_d_3	-9,03	6,28
Q3_d_4	-9,07	5,62
Q3_d_5	-14,72	6,87
Q3_d_6	7,74	4,67
Q3_d_7	5,00	5,41
Q3_d_8	-8,04	7,75
Q3_d_9	-12,30	6,81
Q3_d_10	-8,11	6,58
Q3_d_11	-7,30	6,19
Q3_d_12	-12,52	6,05
Q4_d_1	20,09	15,88
Q4_d_2	35,67	19,25
Q4_d_3	-1,88	3,48
Q4_d_4	-0,77	3,52
Q4_d_5	-9,31	5,28
Q4_d_6	-0,07	2,88
Q4_d_7	-6,25	5,51
Q4_d_8	-5,06	3,99
Q4_d_9	-12,01	6,50
Q4_d_10	-7,26	4,18
Q4_d_11	-7,15	5,37
Q4_d_12	-6,84	3,90

Tabela B.3: Análise global dos desvios-padrões globais diários do Q 4.1.2

Indicador	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_d	3,68
Q2_d	13,90
Q3_d	20,00
Q4_d	20,79

Tabela B.4: Análise global dos desvios-padrões globais diários do Q 1.2.7

Indicador	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_d	3,56
Q2_d	8,79
Q3_d	24,45
Q4_d	15,73

B.2 Janela Semanal

As Tabelas B.5 e B.6 apresentam as referências anuais para os indicadores semanais das *strings* de Q 4.1.2 e Q 1.2.7, respectivamente.

Tabela B.5: Referências anuais para os indicadores semanais do quadro 4.1.2

Indicador	Ref. Anual Média	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_s_1	-3,50	1,24
Q1_s_2	0,33	1,19
Q1_s_3	-0,82	1,11
Q1_s_4	0,72	1,11
Q1_s_5	-1,88	1,07
Q1_s_6	4,25	1,59
Q1_s_7	2,00	1,29
Q1_s_8	-0,16	1,18
Q1_s_9	-2,28	1,13
Q1_s_10	0,70	1,21
Q1_s_11	0,64	3,60
Q1_s_12	0,00	0,73
Q2_s_1	-8,82	3,00
Q2_s_2	-4,13	2,52
Q2_s_3	-6,04	2,49
Q2_s_4	-3,29	1,76
Q2_s_5	-4,86	2,34
Q2_s_6	19,07	4,62
Q2_s_7	16,34	3,64
Q2_s_8	-0,86	3,21
Q2_s_9	-9,04	2,76
Q2_s_10	-1,18	2,66
Q2_s_11	4,35	15,76
Q2_s_12	-1,55	2,40
Q3_s_1	11,52	7,40
Q3_s_2	32,63	9,19
Q3_s_3	-13,54	4,07
Q3_s_4	-10,92	3,20
Q3_s_5	-10,31	3,71
Q3_s_6	14,30	3,92
Q3_s_7	12,51	3,19
Q3_s_8	-6,04	3,45
Q3_s_9	-14,72	4,06
Q3_s_10	-6,38	3,36
Q3_s_11	-1,56	17,26
Q3_s_12	-7,49	3,18
Q4_s_1	20,78	15,88
Q4_s_2	43,66	14,15
Q4_s_3	-9,64	3,40
Q4_s_4	-7,89	2,57
Q4_s_5	-9,57	3,64
Q4_s_6	0,41	2,21
Q4_s_7	-2,35	3,11
Q4_s_8	-5,56	2,74
Q4_s_9	-10,39	3,88
Q4_s_10	-4,76	2,80
Q4_s_11	-8,05	6,62
Q4_s_12	-6,63	2,85

Tabela B.6: Referências anuais para os indicadores semanais do quadro 1.2.7

Indicador	Ref. Anual Média	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_s_1	-4,05	1,24
Q1_s_2	-2,59	1,00
Q1_s_3	-1,39	0,72
Q1_s_4	-2,40	0,62
Q1_s_5	-1,37	0,59
Q1_s_6	3,23	0,87
Q1_s_7	3,93	1,06
Q1_s_8	4,69	2,42
Q1_s_9	-0,31	0,55
Q1_s_10	2,39	1,72
Q1_s_11	-0,07	0,49
Q1_s_12	-1,28	0,61
Q2_s_1	-8,68	2,48
Q2_s_2	-3,77	2,31
Q2_s_3	-3,49	1,32
Q2_s_4	-3,77	1,05
Q2_s_5	-7,06	1,64
Q2_s_6	14,63	2,28
Q2_s_7	14,40	2,42
Q2_s_8	4,24	4,31
Q2_s_9	-2,46	1,05
Q2_s_10	2,12	2,66
Q2_s_11	-0,35	0,94
Q2_s_12	-5,11	1,43
Q3_s_1	17,56	12,94
Q3_s_2	47,49	20,09
Q3_s_3	-8,86	3,85
Q3_s_4	-8,89	3,43
Q3_s_5	-14,58	3,91
Q3_s_6	7,96	2,92
Q3_s_7	5,28	3,37
Q3_s_8	-7,77	4,99
Q3_s_9	-12,05	4,11
Q3_s_10	-7,96	4,34
Q3_s_11	-7,11	3,80
Q3_s_12	-12,37	3,44
Q4_s_1	20,42	9,89
Q4_s_2	37,07	12,08
Q4_s_3	-2,04	2,70
Q4_s_4	-0,89	2,53
Q4_s_5	-9,58	3,08
Q4_s_6	-0,05	2,10
Q4_s_7	-6,20	3,53
Q4_s_8	-5,38	2,63
Q4_s_9	-12,25	3,75
Q4_s_10	-7,55	2,66
Q4_s_11	-7,32	3,25
Q4_s_12	-7,11	2,41

Tabela B.7: Análise global dos desvios-padrões globais semanais do Q 4.1.2

Indicador	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_s	3,20
Q2_s	12,93
Q3_s	18,16
Q4_s	19,89

Tabela B.8: Análise global dos desvios-padrões globais semanais do Q 1.2.7

Indicador	Ref. Anual Desvio-Padrão
Q1_s	3,10
Q2_s	8,18
Q3_s	21,74
Q4_s	15,06

Anexo C

Casos de Falhas nas *Strings*

C.1 *Strings* do Quadro de Junção 4.1.2

A Tabela C.1 apresenta os valores observados para os indicadores de desempenho individuais, para uma janela diária.

Tabela C.1: Análise dos indicadores individuais diários da *string* 11

Data	Q1_d_11_ind	Q2_d_11_ind	Q3_d_11_ind	Q4_d_11_ind
01/10/19 19:00	0,36	0,29	0,23	0,15
01/10/19 19:05	0,36	0,29	0,23	0,13
		↓		
02/10/19 08:10	0,81	0,29	0,23	0,13
02/10/19 08:15	0,91	0,29	0,23	0,13
		↓		
02/10/19 09:55	1,00	0,84	0,23	0,13
02/10/19 10:00	1,00	0,89	0,23	0,13
		↓		
02/10/19 13:50	1,00	1,00	0,79	0,13
02/10/19 13:55	1,00	1,00	0,88	0,13
		↓		
02/10/19 17:20	1,00	1,00	1,00	0,84
02/10/19 17:25	1,00	1,00	1,00	0,92
		↓		
02/10/19 17:40	1,00	1,00	1,00	1,00
02/10/19 17:45	1,00	1,00	1,00	1,00
		↓		
16/10/19 15:45	0,37	0,30	0,85	0,32
16/10/19 15:50	0,37	0,30	0,77	0,32

Referências

- [1] Michael Schmela e SolarPower Europe. Global Market Outlook 2020-2024 – SolarPower Europe, Junho 2020. Último acesso em 2021/02/01. URL: <https://www.solarpowereurope.org/sponsorship-global-market-outlook/>.
- [2] Diário da República, 1.^a série PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS. Relatório técnico. Último acesso em 2021/02/01. Disponível em www.dre.pt.
- [3] Finerge - História. Último acesso em 2021/02/01. URL: www.fingerge.pt/pt/tudo-sobre-a-fingerge/#!historia.
- [4] BloombergNEF. Último acesso em 2021/02/17. URL: <https://about.bnef.com/>.
- [5] Sara Gambone. Tier 1 vs Tier 2 Solar Panels. Último acesso em 2021/02/17. URL: <https://www.paradisepolarenergy.com/blog/tier-1-vs-tier-2-solar-panels>.
- [6] The German Energy Society. *Planning & Installing- Photovoltaic Systems*. Earthscan, 2008.
- [7] What You Need to Know About Solar Panel Warranties - Going Solar. Último acesso em 2021/02/17. URL: <https://goingsolar.com/what-you-need-to-know-about-solar-panel-warranties/>.
- [8] Dirk C. Jordan, Sarah R. Kurtz, Kaitlyn VanSant, e Jeff Newmiller. Compendium of photovoltaic degradation rates. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Julho 2016. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/pip.2744>.
- [9] Tara Doyle, Ryan Deshamais, e Tristan Erion-Lorico. 2020 PV Module Reliability Scorecard. Relatório técnico, PVEL and DNV GL, 2020.
- [10] Fraunhofer Ise. Photovoltaics Report. Relatório técnico, 2020. Último acesso em 2021/02/16. URL: www.ise.fraunhofer.de.
- [11] Gregory M Wilson, Mowafak Al-Jassim, Wyatt K Metzger, Stefan W Glunz, Pierre Verlinden, Gang Xiong, Lorelle M Mansfield, Billy J Stanbery, Kai Zhu, Yanfa Yan, Joseph J Berry, Aaron J Ptak, Frank Dimroth, Brendan M Kayes, Adele C Tamboli, Robby Peibst, Kylie Catchpole, Matthew O Reese, Christopher S Klinga, Paul Denholm, Mahesh Morjaria, Michael G Deceglie, Janine M Freeman, Mark A Mikofski, Dirk C Jordan, Govindasamy TamizhMani, e Dana B Sulas-Kern. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D*, 2020. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>.

- [12] Martin A. Green. The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Julho 2015.
- [13] M.D. Udayakumar, G. Anushree, J. Sathyaraj, e A. Manjunathan. The impact of advanced technological developments on solar PV value chain. *Materials Today: Proceedings*, Novembro 2020.
- [14] Novergy Solar. Multi-busbar solar cells: High performance with low silver consumption, 2020. Último acesso em 2021/02/23. URL: <https://www.novergysolar.com/multi-busbar-solar-cells-high-performance-with-low-silver-consumption/>.
- [15] Powerark Solar. What is Half-Cell technology? What is the difference?, 2020. Último acesso em 2021/02/23. URL: <https://powerarksolar.com.au/what-is-half-cell-technology-what-is-the-difference/>.
- [16] Solar Magazine. Bifacial Solar Panels: Residential Uses and Trends, 2020. Último acesso em 2021/02/18. URL: https://solarmagazine.com/solar-panels/bifacial-solar-panels/#What_is_a_bifacial_solar_panel.
- [17] Greentech Media. Bifacial Plus Tracking Boosts Solar Energy Yield by 27 Percent, 2018. Último acesso em 2021/02/18. URL: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/bifacial-plus-tracking-boosts-solar-energy-yield-by-27-percent#gs.wLGHoLY>.
- [18] Frank Vignola e Fotis Mavromatakis. Performance of PV inverters Teaching solar energy View project Irradiance modeling View project. Relatório técnico, 2008. URL: <https://www.researchgate.net/publication/260286647>.
- [19] Solar Review - End-user Focused Solar Technology Reviews. Último acesso em 2021/02/19. URL: <https://review.solar/>.
- [20] Shriram S. Rangarajan, E. Randolph Collins, J. Curtiss Fox, e D. P. Kothari. A survey on global PV interconnection standards. Em *IEEE Power and Energy Conference at Illinois*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017.
- [21] The Economic Times. Solar Inverters: How do they work, their types and applications, 2020. Último acesso em 2021/02/19. URL: <https://economictimes.indiatimes.com/small-biz/productline/power-generation/solar-inverters-how-do-they-work-their-types-and-applications/articleshow/74669747.cms?from=mdr>.
- [22] Huawei. FusionSolar Utility & Commercial. Último acesso em 2021/02/23. URL: <https://solar.huawei.com/br/Products/FusionSolar>.
- [23] Peter Hacke, Sumanth Lokanath, Paul Williams, Arvind Vasam, Paul Sochor, Govinda Samy TamizhMani, Hirofumi Shinohara, e Sarah Kurtz. A status review of photovoltaic power conversion equipment reliability, safety, and quality assurance protocols, Fevereiro 2018.
- [24] Cláudio Monteiro e Célia Tenente. Proteções nos sistemas PV. *O Electricista*.
- [25] M. Mahbubur Rahman, J. Selvaraj, N. A. Rahim, e M. Hasanuzzaman. Global modern monitoring systems for PV based power generation: A review, Fevereiro 2018.

- [26] Rui Simões e Sérgio Gonçalves. Execução de estruturas metálicas e mistas segundo a norma EN 1090. *Construção Magazine*, Abril 2019. Último acesso em 2021/02/16. URL: <http://www.construcaomagazine.pt/noticias/norma-en1090-estruturas-metalicas/>.
- [27] Josué Lima Morais. *Sistemas Fotovoltaicos da teoria à prática*. Edição do Autor, 2009.
- [28] Catherine Lane. What Is a Solar Tracker and Is It Worth the Investment?, 2021. Último acesso em 2021/02/19. URL: <https://www.solarreviews.com/blog/are-solar-axis-trackers-worth-the-additional-investment>.
- [29] G. Trzmiel, D. Głuchy, e D. Kurz. The impact shading on the exploitation of photovoltaic installations. *Renewable Energy*, Junho 2020.
- [30] Easy Solar. How to calculate the minimum distance between PV panels?, 2020. Último acesso em 2021/02/19. URL: <https://easysolar-app.com/ufaqs/how-to-calculate-the-minimum-distance-between-pv-panels/>.
- [31] Melink Solar. Types of Solar Mounts and Technology. Último acesso em 2021/02/20. URL: <https://melinkcorp.com/solar/types-of-solar-mounts>.
- [32] Tarek O. Kaddoura, Makbul A.M. Ramli, e Yusuf A. Al-Turki. On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia, Novembro 2016.
- [33] Inês Almeida. Avaliação e comparação do potencial solar e fotovoltaico em zonas urbanas. Tese de Mestrado da Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013. URL: <https://run.unl.pt/handle/10362/10933>.
- [34] Vivek Sivaraman Narayanaswamy, Raja Ayyanar, Andreas Spanias, Cihan Tepedelenioglu, e Devarajan Srinivasan. Connection topology optimization in photovoltaic arrays using neural networks. Em *IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Maio 2019.
- [35] S. MacAlpine e C. Deline. Modeling Microinverters and DC Power Optimizers in PVWatts. Relatório técnico, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), Fevereiro 2015. URL: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1171792/>.
- [36] George Pius. Evaluating the Economic Feasibility of Utilizing Power Optimizers in Various PV Systems. Relatório técnico, 2018.
- [37] Toke Franke. The Impact of Optimizers for PV-Modules A comparative study. Relatório técnico, 2019.
- [38] SolarEdge. Power Optimizer Increases Energy Output. Último acesso em 2021-03-03. URL: <https://www.solaredge.com/products/power-optimizer#/>.
- [39] Tigo Energy. Tigo TS4 Flex MLPE. Último acesso em 2021-03-03. URL: <https://www.tigoenergy.com/ts4>.
- [40] Tritec Energy. Photovoltaic (PV) System - Function, Construction & Operation, 2020. Último acesso em 2021/02/22. URL: <https://www.tritec-energy.com/en/photovoltaic-system/>.
- [41] EDP Distribuição. *Manual de ligações à rede elétrica do serviço público*. 2018.

- [42] K.N. Nwaigwe, P. Mutabilwa, e E. Dintwa. An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids. *Materials Science for Energy Technologies*, Dezembro 2019.
- [43] C. Lupangu e R. C. Bansal. A review of technical issues on the development of solar photovoltaic systems, 2017.
- [44] Arash Anzalchi e Arif Sarwat. Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems, Novembro 2017.
- [45] Yuan Kang Wu, Jih Hao Lin, e Huei Jeng Lin. Standards and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Julho 2017.
- [46] R Perez, M David, T E Hoff, M Jamaly, S Kivalov, J Kleissl, P Lauret, M Perez, Richard Perez, Mathieu David, Thomas E Hoff, Mohammad Jamaly, Sergey Kivalov, Jan Kleissl, Philippe Lauret, e Marc Perez. Spatial and Temporal Variability of Solar Energy. *Foundations and Trends R in Renewable Energy*, 2016.
- [47] European Commission. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Último acesso em 2021/02/23. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#TMY.
- [48] PVGIS. Data sources and calculation methods - EU Science Hub. Último acesso em 2021/02/20. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods>.
- [49] Future Energy. Concentrating Collector - an overview | ScienceDirect Topics, 2014. Último acesso em 2021/02/20. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/concentrating-collector>.
- [50] QPV Qualifying PhotoVoltaics. How to measure the performance of your plant?, 2019. Último acesso em 2021/02/24. URL: <https://www.qpv.es/en/news/performance-indicator>.
- [51] Felipe Teixeira. How performance warranties protect revenues – PV magazine International, 2020. Último acesso em 2021/02/24. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/03/19/how-performance-warranties-protect-revenues/>.
- [52] Advanced Technology Services, Inc. Industrial Preventive Maintenance Program, PM Maintenance. Último acesso em 2021/02/24. URL: <https://www.advancedtech.com/industrial-maintenance/factory-comprehensive-maintenance/pm-preventative/>.
- [53] UpKeep. What is Corrective Maintenance? Definition & Examples. Último acesso em 2021/02/24. URL: <https://www.onupkeep.com/learning/maintenance-types/corrective-maintenance>.
- [54] Lisa B. Bosman, Walter D. Leon-Salas, William Hutzal, e Esteban A. Soto. PV System Predictive Maintenance: Challenges, Current Approaches, and Opportunities. *Energies*, Março 2020. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/6/1398>.
- [55] Rachit Srivastava, A. N. Tiwari, e V. K. Giri. An overview on performance of PV plants commissioned at different places in the world, 2020.

- [56] Sma Solar Technology AG. Performance ratio - Quality factor for the PV plant. Relatório técnico. Último acesso em 2021-03-02. URL: <https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-en-11.pdf>.
- [57] Ahmad Mohd Khalid, Indradip Mitra, Werner Warmuth, e Volker Schacht. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants, 2016.
- [58] Cláudio Monteiro. Uma análise interpretativa e abrangente do índice pr usado na avaliação de desempenho de centrais fotovoltaicas. Documento de Trabalho, FEUP, 2021.
- [59] H Haeberlin e Ch Beutler. Normalized representation of energy and power for analysis of performance and online error detection in pv-systems. Em *Proc. 13th EU PV Conference, Nice*, 1995.
- [60] Navid Ghaffarzadeha e Ahmad Azadianb. A Comprehensive Review and Performance Evaluation in Solar (PV). *Journal of Solar Energy Research (JSER)*, 2019.
- [61] Kais Abdulmawjood, Shady S. Refaat, e Walid G. Morsi. Detection and prediction of faults in photovoltaic arrays: A review. *Proceedings - IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG*, 2018.
- [62] Ye Zhao, Brad Lehman, Jean-François de Palma, Jerry Mosesian, e Robert Lyons. Fault analysis in solar pv arrays under: Low irradiance conditions and reverse connections. Em *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2011.
- [63] Andrés Eduardo Nieto, Fredy Ruiz, e Diego Patiño. Characterization of electric faults in photovoltaic array systems. *DYNA (Colombia)*, outubro 2019. URL: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532019000400054&lng=en&nrm=iso&tlng=enhttp://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-73532019000400054&lng=en&nrm=iso&tlng=en.
- [64] Bill Brooks. The ground-fault protection blind spot: A safety concern for larger photovoltaic systems in the united states. *A solar ABCs White paper*, 2012.
- [65] Ye Zhao e Robert Lyons Jr. Ground-fault analysis and protection in pv arrays. *Proc. Photovoltaic Protection*, 2011.
- [66] Siva Ramakrishna Madeti e SN Singh. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. *Solar Energy*, 2017.
- [67] Filipe Monteiro. Análise da criticidade das falhas e a sua monitorização em sistemas solares fotovoltaicos: proposta de uma nova metodologia "custo da deteção". tese de mestrado no instituto superior técnico de lisboa, 2019.
- [68] NI Ahmad, MZA Ab-Kadir, M Izadi, N Azis, MAM Radzi, NH Zaini, e MSM Nasir. Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [69] Y Méndez, I Acosta, JC Rodriguez, J Ramirez, J Bermúdez, e M Martinez. Effects of the pv-generator's terminals connection to ground on electromagnetic transients caused by lightning in utility scale pv-plants. Em *33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE, 2016.

- [70] Shamkumar B Chavan e Maheshkumar S Chavan. Power switch faults, diagnosis and tolerant schemes in converters of photovoltaic systems a review. *Department of Electronic & Communication Technology*, 2014.
- [71] M Köntges, S Kurtz, CE Packard, U Jahn, K Berger, K Kato, T Friesen, H Liu, e M Van Iseghem. Review of failures of photovoltaic modules: IEA PVPS, 2014.
- [72] M Mano, R Pau, R Mahalakshmi, M Karuppasampandian, A Bhuvanesh, e RJ Ganesh. Classification and detection of faults in grid connected photovoltaic system. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 2016.
- [73] Andreas Livera, Marios Theristis, George Makrides, e George E Georghiou. Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems. *Renewable energy*, 2019.
- [74] Ku Nurul Edhura Ku Ahmad, Jeyraj Selvaraj, e Nasrudin Abd Rahim. A review of the islanding detection methods in grid-connected pv inverters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [75] Wei Yee Teoh e Chee Wei Tan. An overview of islanding detection methods in photovoltaic systems. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011.
- [76] Laiber Solar: Projetos Fotovoltaicos. Taxa de Degradação - O Que É, Suas Causas e Seus Impactos. Último acesso em 2021-03-03. URL: <https://laibersolar.com/blog-do-laiber/vida-util-do-painel-solar>.
- [77] Manish Kumar e Arun Kumar. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review, Outubro 2017.
- [78] Zoubida Kherici, Hocine Cheghib, Nabil Kahoul, Mohamed Youness, Belhadj Chekal Afari, e Tarek Hazem. Failure modes of standard photovoltaic modules in Sahara Desert. Em *11th International Renewable Energy Congress, IREC 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Janeiro 2020.
- [79] Dirk C. Jordan, Timothy J. Silverman, Bill Sekulic, e Sarah R. Kurtz. PV degradation curves: non-linearities and failure modes. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Julho 2017. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/pip.2835>.
- [80] N. C. Park, J. S. Jeong, B. J. Kang, e D. H. Kim. The effect of encapsulant discoloration and delamination on the electrical characteristics of photovoltaic module. Em *Microelectronics Reliability*. Pergamon, Setembro 2013.
- [81] Roopmati Meena, Sagarika Kumar, e Rajesh Gupta. Comparative investigation and analysis of delaminated and discolored encapsulant degradation in crystalline silicon photovoltaic modules. *Solar Energy*, 2020.
- [82] Farida Bandou, Amar Hadj Arab, Mohammed Saïd Belkaid, Pierre Olivier Logerais, Olivier Riou, e Abdérai Charki. Evaluation performance of photovoltaic modules after a long time operation in Saharan environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, Outubro 2015.
- [83] M. A. Munoz, M. C. Alonso-García, Nieves Vela, e F. Chenlo. Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. *Solar Energy*, Setembro 2011.

- [84] Shuying Yang e Long Jiang. Crystalline silicon PV module field failures. Em *Durability and Reliability of Polymers and Other Materials in Photovoltaic Modules*. Elsevier, Janeiro 2019.
- [85] Ababacar Ndiaye, Abdérafi Charki, Abdessamad Kobi, Cheikh M.F. Kébé, Pape A. Ndiaye, e Vincent Sambou. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy*, Outubro 2013.
- [86] Huili Han, Xian Dong, Bingzhi Li, Huan Yan, Pierre J. Verlinden, Jiangfeng Liu, Jiapei Huang, Zongcun Liang, e Hui Shen. Degradation analysis of crystalline silicon photovoltaic modules exposed over 30 years in hot-humid climate in China. *Solar Energy*, Agosto 2018.
- [87] D. C. Jordan e S. R. Kurtz. Photovoltaic Degradation Rates- an Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Janeiro 2013. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/pip.1182>.
- [88] Vikrant Sharma e S. S. Chandel. A novel study for determining early life degradation of multi-crystalline-silicon photovoltaic modules observed in western Himalayan Indian climatic conditions. *Solar Energy*, Setembro 2016.
- [89] Ruben Serra dos Anjos. Análise e simulação de pontos quentes em painéis fotovoltaicos. Tese de Mestrado do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2016.
- [90] Michael Streib- Pictures from my work as an expert. Último acesso em 2021-03-11. URL: <http://www.gutachten.streib.de/bilder/index.html>.
- [91] B. Li, C. Delpha, D. Diallo, e A. Migan-Dubois. Application of Artificial Neural Networks to photovoltaic fault detection and diagnosis: A review, Março 2021.
- [92] M. Dhimish, P. Mather, e V. Holmes. Evaluating power loss and performance ratio of hot-spotted photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018.
- [93] Jawad Ahmad, Alessandro Ciocia, Stefania Fichera, Ali Faisal Murtaza, e Filippo Spertino. Detection of typical defects in silicon photovoltaic modules and application for plants with distributed MPPT configuration. *Energies*, 2019.
- [94] Wail Rezgui, Hayet Mouss, Nadia Mouss, Djamel Mouss, Mohamed Benbouzid, e Yasmine Amirat. Photovoltaic module simultaneous open-and short-circuit faults modeling and detection using the I-V characteristic. Em *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Setembro 2015.
- [95] S. Fadhel, C. Delpha, D. Diallo, I. Bahri, A. Migan, M. Trabelsi, e M. F. Mimouni. PV shading fault detection and classification based on I-V curve using principal component analysis: Application to isolated PV system. *Solar Energy*, Fevereiro 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.048>.
- [96] W. Chine, A. Mellit, A. Massi Pavan, e V. Lughi. Fault diagnosis in photovoltaic arrays. Em *5th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2015*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Agosto 2015.
- [97] W. Chine, A. Mellit, A. Massi Pavan, e S. A. Kalogirou. Fault detection method for grid-connected photovoltaic plants. *Renewable Energy*, Junho 2014.

- [98] Santiago Silvestre, Aissa Chouder, e Engin Karatepe. Automatic fault detection in grid connected PV systems. *Solar Energy*, Agosto 2013.
- [99] Lucas de Matos. Uso de imagens de eletroluminescência para detecção de danos mecânicos nos módulos fotovoltaicos. Tese de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020. URL: <http://hdl.handle.net/10183/213188>.
- [100] Gilberto Figueiredo e Marcelo Pinho Almeida. Alternativa de Baixo Custo para Imagens em Eletroluminescência de Módulos Fotovoltaicos. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- [101] Vikrant Sharma, O. S. Sastry, Arun Kumar, Birinchi Bora, e S. S. Chandel. Degradation analysis of a-Si, hetero-junction intrinsic thin layer silicon and m-C-Si solar photovoltaic technologies under outdoor conditions. *Energy*, Agosto 2014.
- [102] Vikrant Sharma e SS Chandel. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [103] S. Daliento, A. Chouder, P. Guerriero, A. Massi Pavan, A. Mellit, R. Moeini, e P. Tricoli. Monitoring, diagnosis, and power forecasting for photovoltaic fields: A review, 2017.
- [104] Dhanup S. Pillai, Frede Blaabjerg, e Natarajan Rajasekar. A Comparative Evaluation of Advanced Fault Detection Approaches for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, Março 2019.
- [105] Andreas Livera, Marios Theristis, George Makrides, e George E. Georghiou. On-line failure diagnosis of grid-connected photovoltaic systems based on fuzzy logic. Em *Proceedings - IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Junho 2018.
- [106] C. Birk Jones, Joshua S. Stein, Sigifredo Gonzalez, e Bruce H. King. Photovoltaic system fault detection and diagnostics using Laterally Primed Adaptive Resonance Theory neural network. Em *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dezembro 2015.
- [107] W. Chine, A. Mellit, V. Lughi, A. Malek, G. Sulligoi, e A. Massi Pavan. A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks. *Renewable Energy*, Maio 2016.
- [108] Syafaruddin, E. Karatepe, e T. Hiyama. Controlling of artificial neural network for fault diagnosis of photovoltaic array. Em *16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2011*, 2011.
- [109] Mahmoud Dhimish, Violeta Holmes, Bruce Mehrdadi, e Mark Dales. Comparing Mamdani Sugeno fuzzy logic and RBF ANN network for PV fault detection. *Renewable Energy*, Março 2018.
- [110] Ye Zhao, Ling Yang, Brad Lehman, Jean François De Palma, Jerry Mosesian, e Robert Lyons. Decision tree-based fault detection and classification in solar photovoltaic arrays. Em *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2012.

- [111] Ammar H Elsheikh, Swellam W Sharshir, Mohamed Abd Elaziz, AE Kabeel, Wang Guilan, e Zhang Haiou. Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. *Solar Energy*, 2019.
- [112] PVsyst - Master Slave Operation. Último acesso em 2021-04-22. URL: <https://www.pvsyst.com/help/masterslave.htm>.