

Daniel Luís Teixeira da Costa Correia

Sistema de monitorização para instalações
fotovoltaicas de pequena dimensão



Daniel Luís Teixeira da Costa Correia

Sistema de monitorização para instalações
fotovoltaicas de pequena dimensão

Dissertação de Mestrado

Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação Industrial

Professor Doutor Paulo Rogério Perfeito Tomé

Professor Doutor Paulo Moisés Almeida da Costa

Financiamentos:

Martifer Solar

Outubro de 2016



“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar onde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.”

Bill Gates

NOTA PRÉVIA

Este trabalho deu origem ao artigo: Sistema de monitorização para instalações fotovoltaicas de pequena dimensão [D. Correia, P. Tomé, P. M. Costa, e L. Marques, “Sistema de monitorização para instalações fotovoltaicas de pequena dimensão”, em 2016 11^a Conferência Ibérica sobre Sistemas de Informação e Tecnologias (CISTI). IEEE, 2016, pp. 1–6].

RESUMO

As fontes de energia renovável têm sido utilizadas como resposta à dependência das fontes de energia fóssil. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica (FV) tem vindo a assumir uma importância crescente.

Em Portugal, a definição do regime de microprodução possibilitou a instalação de sistemas FV com alguns kW de potência instalada. No início de 2015, com a introdução do novo regime para a produção distribuída, tornou-se possível a produção de energia em regime de autoconsumo a partir de pequenos sistemas FV.

Num mercado tão competitivo como o solar FV, as soluções de produção de energia são comercializadas com o menor custo possível. Habitualmente, uma forma de reduzir este custo consiste em não incluir um sistema de monitorização adequado, que permita o acompanhamento da instalação FV. Consequentemente, torna-se difícil avaliar se o desempenho da instalação está de acordo com o esperado, traduzindo-se, muitas vezes, na perda de produção de energia elétrica.

Esta dissertação enquadra-se neste âmbito, tendo como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitorização de baixo custo para instalações FV de pequena dimensão. Este sistema é caracterizado por ser uma solução completa de monitorização, com baixo custo quando comparado com o custo da instalação FV, e de fácil instalação nos pequenos sistemas FV.

O sistema de monitorização desenvolvido permite a recolha, armazenamento e visualização (através de uma interface Web) das variáveis elétricas e meteorológicas relevantes para a adequada monitorização de instalações FV de pequena dimensão, dotadas de um inversor monofásico. Além disso, o sistema desenvolvido possibilita a identificação de situações de falha de produção de energia e permite efetuar análises de desempenho à instalação (através do cálculo de vários indicadores). Por último, o sistema desenvolvido permite a integração com o sistema central de supervisão da Martifer Solar, possibilitando o acompanhamento diário da instalação FV por uma equipa especializada.

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a Martifer Solar, empresa focada no desenvolvimento, Engenharia, Gestão de Compras e Construção (EPC) e serviço de Operação e Manutenção (O&M) das centrais FV.

ABSTRACT

Renewable energy has been used to deal with the dependence of the energy produced through the use of fossil resources. In this context, the photovoltaic (PV) solar energy is a growing reality.

In Portugal, the old regime of microgeneration allowed the installation of PV plants with few kW of installed power. In early 2015, this regime was replaced by a new one that allows energy for selfconsumption to be generated through the use of small PV plants.

In a market so competitive as the photovoltaic, the solutions for electricity generation are sold at the possible lowest cost. Typically, one of the adopted options to reduce these costs consists in avoiding the inclusion of an appropriate monitoring system, which would enable to follow the behavior of the PV plant. Consequently, it becomes difficult to evaluate if the performance of the PV plant is in agreement with the expected, often resulting in the loss of energy production.

This work falls within this context, being its main objective the development of a low-cost monitoring system devoted to small sized PV plants. The developed system is characterized by being a complete monitoring solution, with low cost when compared to the cost of a PV system, and by its easy installation with small PV plants (single inverter plants with installed power up to few kW).

The developed monitoring system is able to collect, store and display electrical and environmental variables that are relevant for a suitable monitoring of a small PV plant. Moreover, it can identify situations of energy production failures and analyze the performance of a PV plant (by calculating performance indicators). Finally, the developed system allows the integration with the central system of supervision of Martifer Solar, which makes the daily monitoring of PV plant by an expert team possible.

This work was developed in partnership with Martifer Solar, a fully-integrated player in the global photovoltaic market focused on Development, EPC (Engineering, Procurement, and Construction) and Operation and Maintenance (O&M) Service.

PALAVRAS-CHAVE

Instalação Fotovoltaica
Sistema de Monitorização
Raspberry Pi
Aquisição de Dados
Base de Dados
Interface Web

KEY WORDS

Photovoltaic Plant
Monitoring System
Raspberry Pi
Data Acquisition
Database
Web Interface

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado a todas as pessoas que contribuíram com particular relevância para que esta dissertação fosse realizada.

Gostaria de agradecer:

Aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Rogério Tomé e Professor Doutor Paulo Moisés Almeida da Costa, pela máxima disponibilidade e dedicação na orientação prestada ao longo da realização do trabalho de mestrado.

Ao meu monitor Engenheiro Luís Marques e também ao Engenheiro Rui Cardoso, pela possibilidade de realização deste trabalho e por todas as orientações transmitidas.

A todo o Departamento de Engenharia Eletrotécnica, em particular ao Professor Doutor Daniel Albuquerque e ao Engenheiro João Ôlas por toda a disponibilidade e ajuda prestada.

À minha família, em especial àqueles com quem lido diariamente, por todo o esforço, para que me fosse concedida a possibilidade de alcançar esta meta.

À Marta, por todo o apoio, carinho e compreensão demonstrados ao longo deste percurso.

A todos os colegas de mestrado pela entreaajuda e companheirismo.

A todos os que não estão aqui mencionados e, que de alguma forma, contribuíram para que este projeto se concretizasse.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
ÍNDICE DE QUADROS	xxiii
ABREVIATURAS E SIGLAS	xxv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação do Trabalho	2
1.3 Objetivos e resultados esperados	5
1.4 Organização do Trabalho	6
2 Sistemas Fotovoltaicos de Pequena Dimensão	7
2.1 Instalações Fotovoltaicas de Pequena Dimensão	7
2.2 Indicadores de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos	10
2.3 Sistemas de Monitorização Fotovoltaica	13
2.3.1 Sistemas de classe A	13
2.3.2 Sistemas de classe B	14
2.3.3 Sistemas de classe C	16
2.3.4 Equipamentos para Medição de Grandezas Elétricas	21
3 Especificações do Sistema de Monitorização	23
3.1 Parâmetros a Monitorizar nas Instalações FV	23
3.2 Cálculo de Indicadores	24
3.3 Detecção e Alerta de Problemas	24
3.3.1 Alarmes de Produção	25
3.3.2 Alarmes de Sistema	26
3.3.3 Tempo de ocorrência e deteção de um Problema	26
3.4 Armazenamento da Dados	26
3.5 Interface de Utilizador	27
3.6 Integração com o Sistema Central de Supervisão da Martifer Solar	29
4 Sistema de Monitorização Desenvolvido	31
4.1 Arquitetura Implementada	31
4.2 Hardware Desenvolvido	33
4.2.1 Computador Raspberry Pi	34

ÍNDICE GERAL

4.2.2	Placa de Aquisição de Dados	35
4.2.2.1	Relógio de Tempo Real	36
4.2.2.2	Conversor Analógico-Digital	37
4.2.3	Hardware para Detecção de Pulsos de Luz	38
4.2.4	Hardware para Medição da Tensão e Corrente	39
4.2.4.1	Medição da Tensão AC do Inversor	40
4.2.4.2	Medição da Corrente AC do Inversor	42
4.2.5	Sensor de Irradiância e Temperatura dos Módulos FV	44
4.2.5.1	Medição da Temperatura	45
4.2.5.2	Medição da Irradiância Solar	46
4.2.6	Sensor de Temperatura Ambiente e Humidade Relativa	47
4.3	Software Desenvolvido	49
4.3.1	Base de dados MySQL	49
4.3.1.1	Estrutura da Base de Dados	49
4.3.1.2	Procedimentos MySQL	52
4.3.2	Algoritmos de Aquisição de Dados	53
4.3.2.1	Algoritmo para Contagem de Pulsos de Luz	53
4.3.2.2	Algoritmo para a Aquisição das Variáveis AC	55
4.3.2.3	Algoritmo para a Aquisição da Irradiância e Temperatura	56
4.3.2.4	Algoritmo para a Aquisição da Humidade Relativa e da Temperatura Ambiente	59
4.3.3	Alarmes	60
4.3.4	Integração com o OMS da Martifer Solar	63
4.3.5	Algoritmo Principal	64
4.3.6	Interface de Utilizador	65
5	Resultados Obtidos e Testes do Sistema	69
5.1	Protótipo Desenvolvido	69
5.2	Teste no Campus da Martifer Solar	71
5.2.1	Medição de Parâmetros	71
5.2.1.1	Parâmetros AC	71
5.2.1.2	Irradiância Incidente	75
5.2.2	Comparação com o Solar-Log 1000	76
5.3	Interface Web	78
5.3.1	Sistema de Autenticação	80
5.3.2	Ecrã “Painel Inicial”	82
5.3.3	Ecrã “Instalação FV”	86
5.3.4	Ecrã de Alarmes	88
5.3.5	Ecrã do Histórico de Dados	92
5.3.6	Ecrã “Configuração da Instalação”	96

5.3.7	Ecrã Definições	98
5.3.8	Ecrã “Estado do Sistema”	100
5.4	Integração com o OMS	101
6	Conclusões	103
6.1	Trabalho Desenvolvido	103
6.2	Trabalhos Futuros	104
	REFERÊNCIAS	107
	Apêndice A	109
	Apêndice B	111
	Apêndice C	113

ÍNDICE DE FIGURAS

1-1	Posicionamento de mercado.	4
1-2	Arquitetura de interligação de n instalações com o sistema central de supervisão da Martifer Solar.	4
2-1	Topologia típica de uma instalação FV de pequena dimensão interligada com a rede.	8
2-2	Exemplo de alguns inversores utilizados nas pequenas instalações, em Portugal.	8
2-3	Pontos de selagem do contador Itron SL7000 e do Iskraemeco MT831.	9
2-4	Localização dos LEDs associados à contagem de energia.	9
2-5	Datalogger Sunny Webbox, Solar-Log 2000, Web'log e GWC v2 respetivamente.	16
2-6	Solução residencial SolarEdge.	17
2-7	Ecrã principal do portal Web "Sunny Portal".	17
2-8	Solar-Log 350, Solar-Log 360 e Solar-Log 370 respetivamente.	18
2-9	Portal Web da Solar-Log.	19
2-10	Arquitetura de funcionamento do Rbee Solar.	19
2-11	Portal Web do Rbee Solar.	20
2-12	Portal Web Enlighten.	21
2-13	Hardware do Engage Solar Kit, EmonTx V3, Wibeec e TED Home Pro respetivamente.	22
3-1	Tempo máximo entre a ocorrência e alerta de um problema.	26
4-1	Monitorização dos parâmetros elétricos e meteorológicos da instalação FV.	32
4-2	Arquitetura do sistema de monitorização desenvolvido.	33
4-3	Comunicação entre o Raspberry Pi e os periféricos utilizados.	34
4-4	Computador Raspberry Pi modelo B+.	34
4-5	Detalhe da interface GPIO do Raspberry Pi.	35
4-6	Placa de aquisição de dados desenvolvida.	35
4-7	Circuito implementado para a ligação do RTC DS1307 ao Raspberry Pi.	36
4-8	Hardware utilizado no relógio de tempo real.	36
4-9	Esquema utilizado para a ligação do ADC MCP3208 ao Raspberry Pi.	37
4-10	Circuito implementado para ligação do TSL257 ao Raspberry Pi.	39
4-11	Hardware desenvolvido para deteção de pulsos.	39
4-12	Transformador PCB utilizado para a medição da tensão.	40
4-13	Tensão RMS, tensão de pico e tensão pico a pico.	41
4-14	Acondicionamento de sinal para a onda de tensão.	41
4-15	Transdutor de corrente YHDC SCT-013-030 da XiDi Technology.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

4-16	Circuito elétrico do SCT-013-030.	43
4-17	Acondicionamento do sinal de saída do transdutor de corrente.	44
4-18	Constituição do sensor de irradiância e temperatura dos módulos.	44
4-19	Sensor DS18B20 encapsulado.	45
4-20	Esquema utilizado para ligação do sensor DS18B20 ao Raspberry Pi.	45
4-21	Medição da queda de tensão aos terminais da resistência R_p	46
4-22	Curva I-V da célula utilizada.	46
4-23	Esquema de ligação da Célula FV ao Raspberry Pi.	47
4-24	Sensor de temperatura ambiente e humidade relativa utilizado.	48
4-25	Esquema de ligação do sensor AM2302 ao Raspberry Pi.	48
4-26	Diagrama de classes das tabelas pertencentes à base de dados.	52
4-27	Fluxograma do algoritmo para o cálculo da energia ativa.	54
4-28	Fluxograma do algoritmo para a aquisição dos parâmetros AC.	55
4-29	Fluxograma do algoritmo para a aquisição da irradiância solar e da temperatura dos módulos FV.	57
4-30	Comparação dos valores da irradiância solar para o dia 04-08-2015.	58
4-31	Comparação dos valores da irradiância solar para o dia 04-08-2015 após a correção.	59
4-32	Fluxograma do algoritmo utilizado para a aquisição da humidade relativa e da temperatura ambiente.	60
4-33	Fluxograma do algoritmo dos alarmes de produção.	61
4-34	Fluxograma do algoritmo de notificação de alarmes.	62
4-35	Fluxograma do algoritmo do envio de ficheiros para o servidor FTP.	63
4-36	Fluxograma do algoritmo principal.	64
4-37	Organograma com os diferentes ecrãs da interface Web.	65
4-38	Camadas utilizadas para a disponibilização da informação.	66
4-39	Diagrama da comunicação cliente-servidor.	67
5-1	Hardware constituinte do protótipo desenvolvido.	70
5-2	Logótipo do Oume Solar.	71
5-3	Detetor de pulsos de luz aplicado no contador de energia.	75
5-4	Comparação entre os valores da potência ativa, para o dia 03-03-2016.	76
5-5	Comparação entre os valores da energia ativa diária, para o mês de Março de 2016.	77
5-6	Comparação entre os valores da irradiância solar, para o dia 03-03-2016.	77
5-7	Comparação entre os valores da irradiação diária, para o mês de Março de 2016.	78
5-8	Acesso à interface gráfica do sistema de monitorização.	78
5-9	Interface Web ajustada de acordo com o tamanho de ecrã do dispositivo.	79
5-10	Visualização de vários ecrãs do Oume Solar num smartphone.	79
5-11	Exemplo de um ecrã do Oume Solar apresentado em Português, Inglês e Japonês.	80

5-12	Ecrã de autenticação.	80
5-13	Opções disponíveis na barra horizontal.	81
5-14	Mensagem de erro de autenticação.	82
5-15	Ecrã “Painel Inicial”.	82
5-16	Botão para a visualização rápida dos alarmes ativos.	83
5-17	Histórico de dados referente aos proveitos diários.	83
5-18	Botões para guardar uma imagem do gráfico ou para o imprimir.	84
5-19	Histórico de dados referente à produção diária.	84
5-20	Histórico de dados referente ao índice de desempenho.	84
5-21	Histórico de dados referente à irradiação incidente.	85
5-22	Histórico de dados referente à produção total.	85
5-23	Barra “Outra informação”.	85
5-24	Botão para imprimir a tabela ou exportar os dados para um ficheiro csv.	86
5-25	Botão para guardar como imagem ou imprimir os gráficos.	86
5-26	Ecrã “Instalação FV”.	87
5-27	Informação adicional referente ao inversor.	87
5-28	Valores das variáveis dos diversos equipamentos monitorizados e respetivos ícones.	88
5-29	Gráficos ilustrativos do valor da potência e da energia produzida pela instalação.	88
5-30	Ecrã “Alarmes”.	89
5-31	Calendário para escolha das datas de consulta dos alarmes.	90
5-32	Exemplo da tabela com o histórico de alarmes.	90
5-33	Vista secundária para a visualização dos alarmes na tabela de histórico.	91
5-34	Botão utilizado para exportar os alarmes para um ficheiro csv.	91
5-35	Exemplo de uma notificação por email de alarmes ocorridos.	91
5-36	Ecrã “Histórico de Dados”.	92
5-37	Lista de equipamentos para consulta do histórico de dados.	92
5-38	Visualização das medidas de acordo com o equipamento escolhido.	93
5-39	Mensagem de alerta após a tentativa de consulta de dados para um intervalo superior a 31 dias.	93
5-40	Ecrã “Histórico de Dados” após a consulta de dados.	94
5-41	Botões da área gráfico.	94
5-42	Gráfico de barras da consulta de dados efetuada.	95
5-43	Histórico de dados em formato tabela.	95
5-44	Exportação de dados para um ficheiro csv.	96
5-45	Ecrã “Configuração da Instalação”.	96
5-46	Consulta dos detalhes iniciais atuais.	97
5-47	Adição de um offset de energia de 100 kWh.	97

ÍNDICE DE FIGURAS

5-48 Botão com a indicação que não está a ser efetuada a monitorização dos pulsos de luz do contador.	97
5-49 Menu do tipo lista para a escolha do TC a utilizar.	98
5-50 Ecrã “Definições”.	98
5-51 Relógio para escolha da hora.	99
5-52 Alerta após tentativa de paragem da aquisição de dados.	99
5-53 Lista com os níveis de acesso dos utilizadores.	99
5-54 Erro após tentativa de introdução de um utilizador com nome já existente.	100
5-55 Erro após tentativa de introdução de um utilizador sem palavra passe.	100
5-56 Processo para eliminar um utilizador de acesso ao sistema de monitorização.	100
5-57 Ecrã “Estado do Sistema”.	101
5-58 Exemplo de uma parte do ficheiro csv enviado.	101
5-59 Visualização dos dados monitorizados pelo Oume Solar no OMS.	102
A-1 Esquema elétrico do hardware utilizado.	109
B-1 Desenho da placa de circuito impresso desenvolvida.	111

ÍNDICE DE QUADROS

2-1	Contadores presentes nos sistemas FV.	8
2-2	Resumo das características de alguns sistemas de monitorização de classe C. . .	16
3-1	Forma de agregação de variáveis.	27
3-2	Exemplo do ficheiro csv a enviar.	29
4-1	Descrição dos pinos do MCP3208.	37
4-2	Modelo dos TCs suportados pelo sistema de monitorização.	43
4-3	Caraterísticas principais do AM2302.	48
4-4	Tabelas da BD dedicadas ao armazenamento das variáveis monitorizadas. . . .	50
4-5	Tabelas da BD dedicadas ao armazenamento dos alarmes.	50
4-6	Tabelas da BD dedicadas ao armazenamento dos indicadores de desempenho .	51
4-7	Tabelas com informação auxiliar.	51
5-1	Custos de hardware e de software do Oume Solar.	70
5-2	Erro da medição no valor eficaz da tensão.	72
5-3	Erro da medição no valor eficaz da corrente.	72
5-4	Erro na medição do valor da potência ativa.	73
5-5	Erro na medição do valor da potência aparente.	73
5-6	Erro na medição do valor do fator de potência.	74
5-7	Erro na medição do valor da irradiância solar.	75
5-8	Menus disponíveis para cada nível de acesso.	81
5-9	Exemplo do conteúdo do ficheiro csv.	96

ABREVIATURAS E SIGLAS

EPC	Engenharia, Gestão de Obra e Construção.
UE	União Europeia.
FV	Fotovoltaico.
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público.
LED	Light-Emitting Diode.
STC	Standard Test Conditions.
SCADA	Supervision Control And Data Acquisition.
HMI	Human-Machine Interface.
RTU	Remote Terminal Unit.
MTU	Master Terminal Unit.
GSM	Global System for Mobile Communications.
CSV	Comma-Separated Values.
SQL	Structured Query Language.
FTP	File Transfer Protocol.
PCB	Printed Circuit Board.
GPIO	General Purpose Input/Output.
TTL	Transistor-Transistor Logic.
ADC	Analog-to-Digital Converter.
SPI	Serial Peripheral Interface.
I²C	Inter-Integrated Circuit.
RTC	Real Time Clock.
BD	Base de Dados.
IP	Internet Protocol.
SMS	Short Message Service.

1. Introdução

O presente trabalho descreve o processo de desenvolvimento de um sistema de monitorização para instalações fotovoltaicas de pequena dimensão.

Neste capítulo é feito o enquadramento do trabalho, assim como a motivação que levou à sua realização. De seguida, são apresentados os objetivos do trabalho. Por último, este capítulo descreve a disposição dos conteúdos presentes na dissertação.

1.1 Enquadramento

Nas últimas décadas o mundo tem vindo a despertar para a necessidade do equilíbrio e sustentabilidade ambiental [1]. Neste contexto, existe uma particular preocupação com o setor da energia, nomeadamente em países com acentuada preponderância dos combustíveis fósseis no conjunto das energias primárias que consomem. A preocupação com a sustentabilidade energética é também um assunto que tem merecido particular atenção dos países desenvolvidos, principalmente daqueles que apresentam maior dependência energética. A necessidade de lidar com os impactos ambientais resultantes da produção e utilização da energia e a procura de uma menor dependência energética têm conduzido vários países a desenvolver, entre outras medidas, políticas de incentivo à instalação de unidades de produção de eletricidade por via renovável.

A União Europeia (UE), no âmbito das novas diretrizes para o clima e energia, definiu como objetivo, vinculativo à escala da UE, que 27% da energia consumida em 2030, seja proveniente

de fontes renováveis [2]. Neste contexto, a energia solar é das melhores respostas à dependência das fontes de energia fóssil, tais como o petróleo e o gás natural.

Portugal, é um dos países da Europa com melhores condições para o aproveitamento da energia solar, dispondo, em média, de 2200 a 3000 horas de sol por ano no caso do território Continental. Nos arquipélagos dos Açores e da Madeira essa média é de 1700 a 2200h, respetivamente. Consequentemente, a produção fotovoltaica (FV) tem sido uma das tecnologias promovidas para a produção renovável de eletricidade visando a sustentabilidade ambiental e energética.

A definição do regime de microprodução [3] [4] permitiu a Portugal a instalação de pequenos sistemas FV, com potências instaladas na ordem dos kW. Este regime possibilitou a proliferação destas pequenas instalações, mais concretamente dos sistemas FV com potência instalada igual a 3,68 kW. No início de 2015 entrou em vigor um novo regime que regula as instalações de produção distribuída de eletricidade em Portugal, substituindo os antigos regimes de miniprodução e de microprodução pelos regimes de produção para autoconsumo e de pequena produção [5]. No regime de autoconsumo, a produção de energia elétrica para consumo próprio torna-se uma realidade, possibilitando que pequenos sistemas FV sejam instalados preferencialmente para satisfazer as necessidades de consumo.

Num mercado tão competitivo como o solar FV é necessário que as pequenas instalações FV sejam comercializadas com o menor custo possível. Neste contexto, estas instalações têm sido habitualmente construídas sem um sistema de monitorização ou, em alguns casos, com um sistema de monitorização inadequado, permitindo, desta forma, uma redução de custos para o cliente. Contudo, esta situação traduz-se num não acompanhamento ou num acompanhamento deficiente da instalação FV, tornando complexa a avaliação do seu desempenho técnico-económico. Deste modo, existe a necessidade de encontrar soluções que permitam monitorizar o desempenho das pequenas instalações por forma a serem ultrapassados estes desafios.

1.2 Motivação do Trabalho

A monitorização do desempenho técnico-económico das instalações FV é, no contexto do respetivo controlo, otimização e operação, uma ferramenta importante. Em centrais FV de média e grande potência instalada (centenas de kW a MW) esta monitorização é, geralmente, estabelecida. Contudo, a utilização de sistemas de monitorização em instalações FV de pequena potência, habitualmente com alguns kW de potência instalada, tipicamente com uma estrutura monoinversor, é menos comum.

A inexistência de um sistema de monitorização adequado dificulta a análise do desempenho destas instalações, incluindo a deteção de potenciais avarias que se traduzam na perda de produção de energia elétrica. O custo associado a um sistema de monitorização é o principal fator para que não se proceda à sua instalação.

Efetivamente, existem diversas soluções para a monitorização das pequenas instalações FV (ex: Rbee Solar e Solar-Log & GE Meter). Algumas destas soluções incluem um sensor para a medição da irradiância solar, o que encarece de forma substancial a solução. Outros sistemas de monitorização têm a possibilidade de obter valores de irradiância solar através de dados de satélite, o que não permite a deteção de falhas em tempo real comprometendo o ótimo desempenho da instalação. Outras soluções menos dispendiosas, baseadas em sistemas dedicados à gestão de consumos energéticos, limitam-se a medir tensões e correntes e a calcular o valor da respetiva potência e energia, não permitindo uma monitorização adequada das instalações FV, particularmente no que se refere ao acompanhamento do seu desempenho.

Consequentemente, estas instalações são, geralmente, “monitorizadas” pela remuneração mensal da energia injetada na rede ou através da leitura manual e frequente dos aparelhos de contagem da energia produzida. Como facilmente se compreende, esta forma de monitorização apresenta riscos de perda de remuneração nas unidades FV, devido à potencial deteção tardia de falhas no seu funcionamento.

Analisando a situação em Portugal, existiam até ao final de 2014, 25999 instalações FV com potência instalada inferior ou igual a 3,68 kW [6]. Destas instalações, a grande maioria não dispõe de um sistema de monitorização, enquanto que uma pequena parte dispõe de sistemas obsoletos ou inadequados. Compreende-se, pelo exposto, a existência clara de uma oportunidade de mercado para a monitorização destas pequenas instalações que se encontram “parcialmente abandonadas” e, potencialmente, com rendimento inferior ao que seria possível de obter (comprometendo o desempenho económico destas instalações).

A presente dissertação insere-se neste âmbito e tem, como objetivo fundamental o desenvolvimento de um sistema de monitorização de baixo custo, para a monitorização de instalações FV com alguns kW de potência instalada. Na Figura 1-1 é apresentado o posicionamento de mercado para o sistema de monitorização a desenvolver.

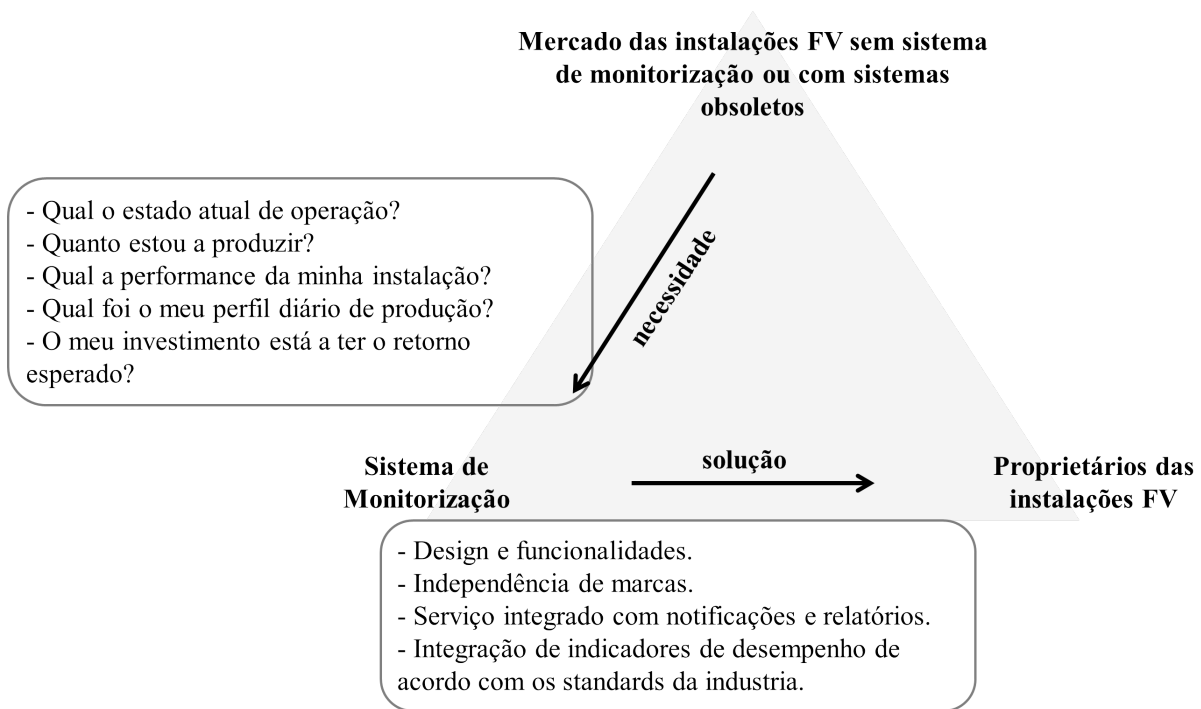


Figura 1-1: Posicionamento de mercado.

Optando-se por uma solução de hardware simples e de fácil instalação é possível chegar a um grande número de pequenos produtores de energia, permitindo-lhes oferecer, não apenas uma solução de monitorização, através de uma página Web, mas também a possibilidade de interligação com o centro de supervisão da Martifer Solar. Tal como ilustrado na Figura 1-2, esta interligação vai permitir que várias instalações do mesmo proprietário tenham toda a sua informação centralizada no sistema da Martifer Solar.

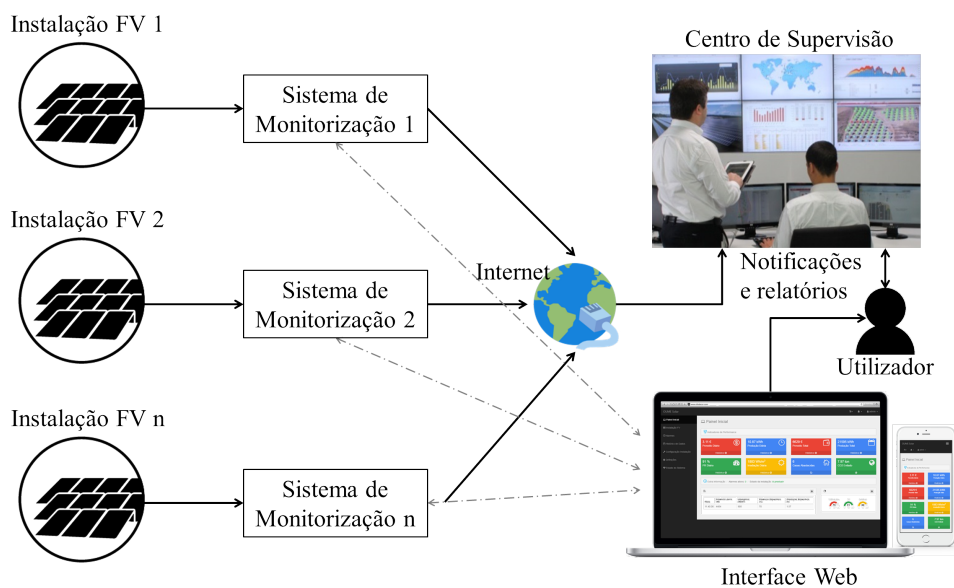


Figura 1-2: Arquitetura de interligação de n instalações com o sistema central de supervisão da Martifer Solar.

Com toda a informação concentrada no mesmo ponto será possível o acompanhamento diário das instalações através de uma equipa especializada, permitindo a comparação e deteção de desvios no desempenho destas instalações.

1.3 Objetivos e resultados esperados

O presente trabalho tem como objetivo fundamental o desenvolvimento de um sistema de monitorização de baixo custo aplicável a instalações FV de pequena dimensão dotadas de um inversor monofásico.

O sistema a desenvolver deve apresentar-se como uma solução completa de monitorização, que inclua todo o hardware e software necessários para a monitorização das pequenas instalações fotovoltaicas. Esta solução deve permitir a recolha e armazenamento de todos os dados relevantes para a adequada monitorização das pequenas instalações, assim como permitir a sua visualização, graficamente ou em tabela, a partir de uma página Web. O sistema deve ainda fornecer informação sobre o desempenho da instalação, alertar o utilizador para a ocorrência de avarias na instalação e ser integrado com o sistema central de supervisão da Martifer Solar (OMS - *Operation and Maintenance System*).

Por forma a tornar o sistema comercialmente viável, é necessário que este se apresente como uma solução não invasiva, de fácil instalação e com um custo inferior a 200€.

O desenvolvimento da solução pretendida, envolve as seguintes tarefas principais:

- Levantamento dos equipamentos presentes nas pequenas instalações FV;
- Definição dos parâmetros a monitorizar nas pequenas instalações FV;
- Desenvolvimento do hardware;
- Desenvolvimento do software de controlo do sistema de monitorização;
- Desenvolvimento da interface gráfica em ambiente Web;
- Instalação do sistema de monitorização desenvolvido no Campus Tecnológico da Martifer Solar;
- Integração do sistema de monitorização desenvolvido com o sistema central de supervisão da Martifer Solar;
- Testes com o sistema de monitorização implementado.

1.4 Organização do Trabalho

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos.

No capítulo 1 é apresentado o enquadramento relativo ao tema da presente dissertação, assim como a motivação e os objetivos associados à sua elaboração. Por último, é feita uma descrição breve da estrutura adotada para a dissertação.

O capítulo 2 aborda os principais constituintes de uma instalação FV de pequena dimensão. São também apresentados vários indicadores de desempenho utilizados para avaliar uma instalação FV. Por último, é efetuado um estudo aos diferentes sistemas de monitorização existentes (comerciais e académicos), incidindo-se sobre os sistemas de monitorização para pequenas instalações FV.

No capítulo 3 estão presentes as especificações seguidas durante o desenvolvimento do sistema de monitorização. Algumas destas especificações referem-se aos parâmetros a monitorizar, indicadores de desempenho, alarmes e ao armazenamento de informação.

O capítulo 4 é dedicado à descrição do sistema de monitorização desenvolvido. É apresentada a arquitetura implementada, descrevendo-se todo o hardware e software desenvolvidos.

O capítulo 5 é reservado aos resultados obtidos no processo de teste do sistema de monitorização, que foi efetuado no Campus Tecnológico da Martifer Solar. Neste capítulo, são validados os dados obtidos pelo sistema de monitorização desenvolvido. São também comparados os valores obtidos pelo sistema de monitorização desenvolvido e por um sistema de monitorização comercial. É ainda efetuada a apresentação, em detalhe, da interface gráfica desenvolvida.

Por último, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado nesta dissertação, assim como as perspetivas para trabalhos futuros.

2. Sistemas Fotovoltaicos de Pequena Dimensão

As instalações FV permitem gerar energia elétrica através da energia solar. A necessidade de se obter o máximo desempenho de um sistema FV aumentou, consideravelmente, a importância da utilização de sistemas de monitorização adequados, que através do cálculo de indicadores, permitem avaliar o seu desempenho.

Neste capítulo são abordados os principais constituintes de uma instalação FV de pequena dimensão. Seguidamente, descrevem-se os principais indicadores de desempenho de uma instalação FV. Por último, são apresentados diversos sistemas de monitorização de instalações FV, incidindo-se sobre os sistemas de monitorização para pequenas instalações.

2.1 Instalações Fotovoltaicas de Pequena Dimensão

Uma instalação de pequena dimensão é geralmente associada a um sistema FV com uma potência instalada inferior a 10 kW. Estas instalações são habitualmente designadas por instalações fotovoltaicas residenciais, que incluem as abrangidas pelo antigo regime de microprodução [3] [4].

As pequenas instalações são constituídas por um conjunto de módulos fotovoltaicos, um inversor, um contador de energia e os necessários equipamentos de ligação, corte e proteção elétrica. Na Figura 2-1 é ilustrada a topologia típica de uma instalação FV de pequena dimensão interligada com a rede.

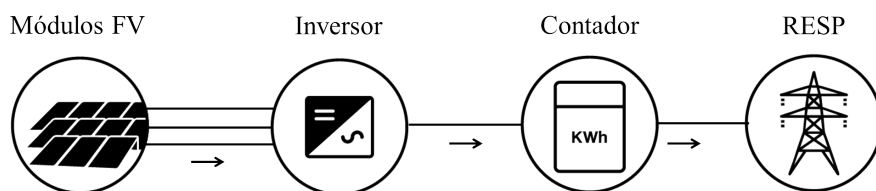


Figura 2-1: Topologia típica de uma instalação FV de pequena dimensão interligada com a rede.

Os módulos FV, constituídos por células baseadas em semicondutores [7], são utilizados para converter a energia solar em energia elétrica, através do efeito FV.

O inversor converte a corrente contínua, proveniente dos módulos FV, em corrente alternada. Na Figura 2-2 são ilustrados alguns inversores utilizados nos pequenos sistemas FV.

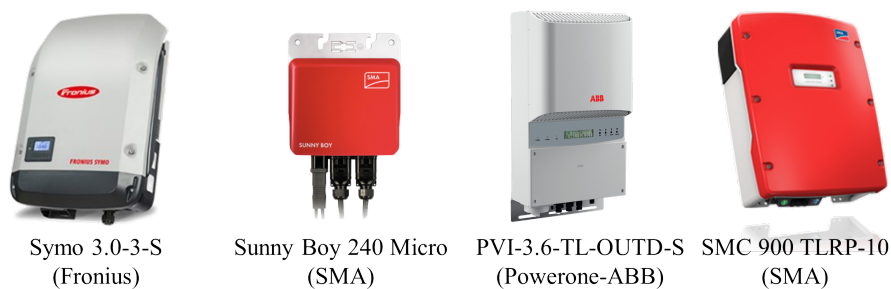


Figura 2-2: Exemplo de alguns inversores utilizados nas pequenas instalações, em Portugal.

Estes inversores, dependendo do fabricante e/ou modelo, dispõem de diferentes interfaces de comunicação que são utilizadas para a recolha de dados por sistemas de monitorização. Atualmente, alguns fabricantes disponibilizam os dados utilizando o protocolo de comunicação Modbus (protocolo standard muito utilizado na indústria), contudo existem vários fabricantes que optam pela utilização de protocolos proprietários.

O contador de energia tem como principal finalidade a medição da energia elétrica produzida pelo sistema FV. No Quadro 2-1 apresentam-se vários contadores de energia utilizados nas instalações FV.

Quadro 2-1: Contadores presentes nos sistemas FV.

Marca / Fabricante	Modelo
Iskaemeco	MT831
Itron	SL7000
Janz	A1700/C280
Landys+GYR	ZMG310/405/410
Siemens	Z.D300/400
Circuitor	212/410

O contador de energia, após instalado e parametrizado pela entidade instaladora (devidamente autorizada/credenciada), é selado pela entidade a quem é vendida a energia. Esta situação tem o intuito de prevenir alterações, quer ao nível do hardware quer ao nível do software, que possam causar adulterações nas medições feitas pelo contador. A Figura 2-3 mostra, a título de exemplo, um contador de energia Itron SL7000 de uma instalação FV da Martifer Solar, devidamente selado. O lado direito da figura mostra os pontos de selagem de um contador Iskraemeco MT831.

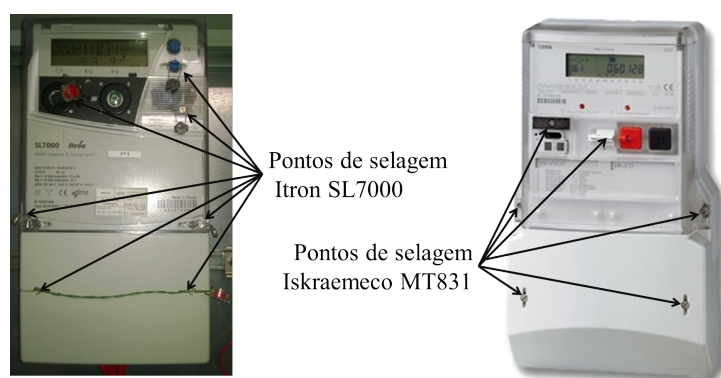


Figura 2-3: Pontos de selagem do contador Itron SL7000 e do Iskraemeco MT831.

Todos os contadores presentes no Quadro 2-1 dispõem de interfaces de comunicação que possibilitam a recolha de dados dos contadores por sistemas de monitorização. As mais comuns são: i) a interface ótica; ii) a interface RS-232; iii) a interface RS-485; iv) e a interface por pulsos. Algumas destas interfaces permitem ainda a configuração e parametrização dos contadores, pelo que o seu acesso encontra-se devidamente selado, tornando-as inacessíveis para a utilização num sistema de monitorização.

Importa salientar que nos contadores presentes no Quadro 2-1, estão presentes dois LEDs indicadores de produção ou consumo de energia. Um LED referente à energia ativa e outro à energia reativa. Na Figura 2-4 é ilustrada, (com círculos vermelhos), a localização de ambos os LEDs em diferentes contadores.



Figura 2-4: Localização dos LEDs associados à contagem de energia.

Ao contrário das instalações de maior dimensão, as pequenas instalações não dispõem, habitualmente, de um sistema de monitorização. A sua ausência reflete-se, igualmente, na ausência de qualquer tipo de sensores para a aquisição de variáveis meteorológicas.

2.2 Indicadores de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos

O investimento necessário para a construção de uma Instalação FV de grande dimensão é muito elevado. Nas pequenas instalações, embora o custo seja obviamente mais reduzido, continua a ser necessário assegurar o máximo desempenho da instalação FV, possibilitando deste modo um retorno do investimento de acordo com o esperado. Neste contexto, são utilizados determinados indicadores de desempenho que permitem avaliar o sistema FV relativamente a determinados parâmetros de referência.

Apresentam-se de seguida os principais indicadores utilizados na análise de desempenho dos sistemas FV, assim como outros indicadores habitualmente presentes nos sistemas de monitorização FV.

Índice de Desempenho (ID)

O ID é o indicador mais importante na análise do desempenho de sistemas FV. Este indicador é geralmente designado por PR, iniciais de *Performance Ratio*.

O PR traduz a relação entre as produções de energia real e teórica, independentemente do alinhamento, (orientação e inclinação), do sistema, podendo ser utilizado na comparação de instalações FV localizadas em locais distintos. Este indicador é expresso em percentagem, pelo que um valor mais próximo de 100% traduz-se num sistema mais eficiente. No entanto, um valor igual a 100% é inatingível, uma vez que durante a operação do sistema FV ocorrem perdas inevitáveis, tais como perdas na cablagem, no inversor e de desajustamento provocadas pela variação da inclinação da irradiância incidente. Este indicador é calculado de acordo com a equação 2.1 (adaptado de [8]).

$$PR = \frac{E_{prod}(\Delta t)}{\frac{G_{total}(\Delta t)}{G_{STC}} \times P_p} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

- Δt é o período de tempo ao qual se refere o cálculo;
- $E_{prod}(\Delta t)$ é a energia produzida pela instalação durante o período Δt , em kWh;
- $G_{total}(\Delta t)$ é o valor total da irradiação incidente obtida pelo sistema de monitorização, em kWh/m²;

- P_p é a potência de instalada do sistema FV, em KW;
- G_{STC} é o valor da irradiância nas condições STC (1000 W/m²).

Fator de Capacidade (FC)

O FC é um indicador que estabelece a relação entre a energia produzida pela instalação FV e a energia que seria produzida caso o sistema estivesse a operar à sua máxima capacidade, durante todo o período de análise (1 ano). Este indicador, expresso em percentagem, é dado pela equação 2.2 [9].

$$CF = \frac{H_1 \times A \times PR}{P_p \times 8760} \quad (2.2)$$

Onde:

- H_1 é a irradiação incidente anual, expressa em kWh/m²;
- A é a área dos painéis FV da instalação, em m²;
- PR é o *Performance Ratio* anual, em %;
- P_p é a potência instalada do sistema FV, em kW_p;

Eficiência dos Módulos Fotovoltaicos (EM)

O valor da eficiência dos módulos fotovoltaicos, expresso em percentagem, é calculado utilizando-se a Equação 2.3 [9].

$$EM = \frac{E_{DC}}{G_{total}} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

- E_{DC} é a energia do lado DC da instalação FV, em Wh;
- G_{total} é o valor total da irradiação incidente sobre os módulos fotovoltaicos, em kWh/m².

Produção Específica (PrE)

A produção específica é um indicador que traduz o equivalente em número de horas a que a instalação opera com uma irradiância constante de 1000 W/m². É um indicador muito útil na comparação de instalações FV. Este indicador, expresso em horas/período de tempo, é dado pela equação 2.4.

$$PrE = \frac{E}{P_p} \quad (2.4)$$

Onde:

- E é a energia produzida pela instalação FV, no período considerado, em kWh;
- P_p é a potência de pico do sistema FV, em kW_p.

Potência Específica (PtE)

A potência específica traduz a potência ativa da instalação num determinado instante, em percentagem da potência instalada. Este indicador é calculado através da equação 2.5.

$$Pt_E = \frac{P}{P_p} \quad (2.5)$$

Onde:

- P é potência ativa produzida pela instalação no momento do cálculo, em kW;
- P_p é a potência de pico do sistema FV, em kW_p.

Irradiância Normalizada (IN)

A irradiância normalizada traduz a irradiância que incide nos módulos FV num determinado instante, em percentagem do valor da irradiância nas condições STC (1000 W/m²). A IN, expressa em percentagem, é calculada através da equação 2.6.

$$I_N = \frac{G_{ATUAL}}{G_{STC}} \times 100 \quad (2.6)$$

Onde:

- G_{ATUAL} é o valor da irradiância incidente no momento do cálculo, expressa em W/m²;
- G_{STC} é o valor da irradiância às condições STC (1000 W/m²).

Equivalente de casas abastecidas (ECA)

Este indicador traduz a quantidade de habitações típicas que seriam abastecidas pelo sistema FV, tendo em consideração a quantidade de energia produzida pelo sistema FV. Para o cálculo deste indicador é considerada uma habitação com 6,9 kVA de potência contratada e com um consumo anual de eletricidade de 3673 kWh [10]. Este indicador é calculado pela equação 2.7.

$$ECA = \frac{E}{3673} \quad (2.7)$$

Onde:

- E é energia produzida pela instalação FV, em kWh.

CO₂ Evitado

O CO₂ é emitido para a atmosfera durante a geração de energia elétrica em centrais baseadas na queima de combustíveis fósseis. A energia elétrica gerada através de recursos renováveis, como o caso da fotovoltaica, não produz CO₂ durante a respetiva produção. O indicador de CO₂ evitado traduz a quantidade de CO₂ que não é emitido para a atmosfera devido à produção de energia através de um recurso renovável.

$$CO_2 = E \times 0,578 \quad (2.8)$$

Onde:

- E é a energia produzida pela instalação FV, em MWh;
- 0,578 são as emissões de referência do sistema elétrico português, em tCO₂/MWh [11].

2.3 Sistemas de Monitorização Fotovoltaica

Os sistemas de monitorização disponibilizam informação detalhada sobre o funcionamento e rendimento da instalação FV, permitindo monitorizar uma instalação remotamente, em qualquer momento e a partir de qualquer lugar. A informação é constantemente atualizada, podendo ser visualizada, de forma resumida ou de forma mais complexa, através de dispositivos locais ou através de um acesso à Internet.

A escolha de um sistema de monitorização está geralmente associada ao tipo e número de equipamentos a monitorizar, ao número de variáveis a adquirir e à potência da instalação FV que se pretende monitorizar. Assim, é possível classificar os sistemas de monitorização em três classes:

- Classe A: sistemas de monitorização aplicados a grandes centrais FV, com potência instalada na ordem dos MW;
- Classe B: sistemas de monitorização aplicados a instalações FV de média dimensão, com potência instalada na ordem das dezenas até várias centenas de kW. Contudo, estes sistemas podem ser aplicados para potências mais elevadas;
- Classe C: sistemas de monitorização aplicados em instalações FV de pequena dimensão, com alguns kW de potência instalada, podendo, no entanto, ser aplicados a potências superiores.

2.3.1 Sistemas de classe A

Os sistemas de classe A são geralmente associados aos sistemas SCADA. Um sistema SCADA, (Supervision Control And Data Acquisition), integra software e hardware que possibilita a monitorização e o controlo de sistemas geograficamente distribuídos.

Utilizados em instalações FV de grande dimensão, os sistemas SCADA proporcionam flexibilidade na monitorização e controlo, em tempo real, dos equipamentos de uma instalação FV, incluindo seguidores solares, inversores, caixas de junção, contadores de energia, estações meteorológicas ou mesmo subestações elétricas. Um SCADA permite a análise do desempenho das instalações FV, calculando e analisando vários indicadores, (*performance*

ratio, produção específica, eficiência dos módulos, etc).

Os sistemas SCADA possibilitam a aquisição de dados dos equipamentos presentes nos sistemas FV, a monitorização e processamento de eventos, bem como o controlo de diversos equipamentos [12]. Para executar estas funções, o sistema SCADA é geralmente constituído pela interface homem-máquina (HMI, *Human Machine Interface*), por unidades remotas (RTU, *Remote Terminal Unit*) e pela unidade central (MTU, *Master Terminal Unit*) [13].

A implementação de sistemas SCADA possibilita que sejam efetuadas operações de controlo e monitorização da central FV, sem que exista a necessidade do operador se deslocar fisicamente ao local da instalação.

Existem comercialmente muitas soluções SCADA. Por exemplo, o SCADA “Piensa Solar” é uma ferramenta que permite ao utilizador analisar e reunir todos os dados da instalação FV. Segundo o fabricante, este sistema de monitorização é capaz do controlo e otimização da produção, comunicação com diversos equipamentos, (tais como: autómatos, inversores e contadores), controlo de acessos configurável, comunicação em tempo real através da Internet e suporte remoto [14]. O SCADA PVGuard, do fabricante Skytron, é outra ferramenta, projetada especificamente para monitorização de centrais FV na gama dos MW. Este sistema de monitorização apresenta uma representação gráfica detalhada e uma gestão de alarmes abrangente [15].

2.3.2 Sistemas de classe B

Os sistemas de monitorização de classe B apresentam menos funções e algumas limitações quando comparados com os sistemas SCADA, contudo têm um custo inferior. As grandes limitações destes sistemas de monitorização prendem-se com o número de equipamentos e variáveis a monitorizar, o número de dias de armazenamento de histórico e, em alguns casos, com a necessidade de utilizar apenas hardware do mesmo fabricante.

Estão disponíveis comercialmente diversos sistemas de monitorização de diversos fabricantes, sendo que alguns são apresentados de seguida.

Solar-Log

O Solar-Log é um equipamento desenvolvido para monitorizar instalações FV, compatível com a grande maioria dos inversores. Existem diferentes modelos deste equipamento, que podem ser aplicados de acordo com a potência da instalação que se pretende monitorizar. Por exemplo, o Solar-Log 2000 é capaz de monitorizar sistemas FV até um máximo de 2000 kW. De acordo com o fabricante, o Solar-Log 2000 permite [16]: i) monitorizar até 100 inversores;

ii) a interligação de 10 “Solar-Log 2000” numa instalação; iii) e a monitorização do seu consumo energético, apresentado-a graficamente através do portal Web da Solar-Log, o “WEB Solar-Log™ Commercial Edition”.

SMA - Sunny Webbox

O sistema de monitorização Sunny Webbox, desenvolvido pela SMA, permite apenas a monitorização de inversores e outros equipamentos deste fabricante. Este sistema garante o acesso aos dados da instalação FV, através da Internet, pelo portal Web “Sunny Portal”. Segundo o fabricante, o Sunny Webbox permite [17]: i) a monitorização remota da instalação, diagnóstico e configuração; ii) a deteção de falhas de operação; iii) a monitorização até 50 inversores via RS485; iv) e o acesso ao portal online “Sunny Portal” para consulta dos dados da instalação.

Higeco GWC

O GWC, do fabricante Higeco, é um sistema de monitorização desenvolvido para ser utilizado em diversas áreas. É utilizado, por exemplo, na indústria, (para gestão de consumos energéticos), e na monitorização de instalações FV. Segundo o fabricante, o modelo mais recente deste sistema de monitorização, o GWC v2 dispõe [18]: i) de um portal online; ii) de múltiplos protocolos para comunicação com diversos equipamentos; iii) de configurações de acordo com as necessidades do cliente; iv) de capacidade para adquirir mais de 1000 variáveis de múltiplos equipamentos; v) e de um sistema operativo Linux.

Metecontrol Web’log

O Web’log, desenvolvido pela Meteocontrol, recolhe os dados provenientes dos inversores, contadores de energia e sensores meteorológicos armazenando-os localmente, sendo enviados posteriormente para os servidores online da Meteocontrol. Este sistema de monitorização dispõe de uma interface Web (opcional) que permite o acesso remoto ao datalogger para consulta de informações/estado da instalação. Segundo o fabricante, esta solução de monitorização possibilita [19]: i) a consulta do histórico dos dados da instalação FV armazenados no datalogger; ii) a transferência de dados para o portal online “Safer’Sun Professional”; iii) o controlo da potência ativa com base num fator de potência pré definido; iv) a utilização de múltiplos protocolos de comunicação, incluindo Modbus; v) e a utilização de um modem GPRS/GSM.

Na Figura 2-5 são ilustrados os dataloggers dos respetivos sistemas de monitorização apresentados anteriormente.



Figura 2-5: Datalogger Sunny Webbox, Solar-Log 2000, Web'log e GWC v2 respetivamente.

2.3.3 Sistemas de classe C

Os sistemas de monitorização de classe de C são desenvolvidos para monitorizar instalações FV de habitualmente alguns kW. Estes sistemas são os mais indicados para a monitorização das pequenas instalações FV. Na Tabela 2-2 são apresentadas algumas características relevantes de alguns sistemas de monitorização disponíveis comercialmente.

Quadro 2-2: Resumo das características de alguns sistemas de monitorização de classe C.

Nome	Custo	Portal Web	Medição Irradiância	Alertas Email	Interface Web local
SolarEdge	-	Sim	Não	Sim	Não
SMA Residential	-	Sim	Não	Sim	Não
Solar-Log & GE Meter	570 ¹	Sim ²	Sim ³	Sim	Não
Rbee Solar	250 ⁴	Sim	Sim ⁵	Sim	Não
Enphase Envoy	520	Sim	Não	Sim	Não

É pertinente referir que estes sistemas de monitorização apresentam algumas limitações quando comparados com os sistemas de monitorização de classe B. Em seguida efetua-se uma descrição dos sistemas de monitorização presentes no Quadro 2-2.

SolarEdge

A solução de monitorização residencial da SolarEdge é baseada no envio de dados pelo inversor presente na instalação FV para o portal Web da SolarEdge. Para a utilização deste sistema é necessário ter um inversor deste fabricante. Esta solução tem a vantagem de não ser necessário adicionar hardware, além do presente, na instalação FV. Na Figura 2-6 é ilustrada a solução apresentada pela SolarEdge.

¹Preço do modelo 350.

²Gratuito por 5 anos.

³Apenas no modelo 370, encarecendo a solução para valores superiores a 800€.

⁴Custo sem o valor das comunicações do cartão SIM.

⁵Solução de medição da irradiância por satélite. Não permite medição em tempo real.

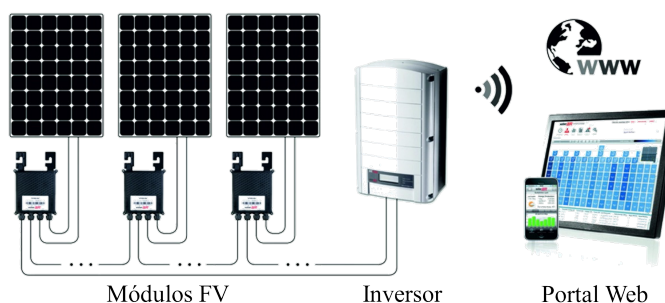


Figura 2-6: Solução residencial SolarEdge.

O sistema SolarEdge não inclui sensores para a medição de variáveis meteorológicas, incluindo a irradiância solar. Consequentemente, este sistema não permite efetuar análises de desempenho e de situações de desvio de produção do sistema FV.

Os dados referentes à instalação FV monitorizada não podem ser consultados através de uma interface Web local, ficando o utilizador dependente do portal online da SolarEdge. Este portal permite apenas a consulta dos últimos 12 meses como uma resolução de 10 minutos.

SMA Residential

A solução SMA Residential é similar à oferecida pela SolarEdge. A monitorização é efetuada através do inversor, fabricado pela SMA, que envia os dados para o portal Web “Sunny Portal”. Na Figura 2-7 é mostrado o ecrã principal deste portal.

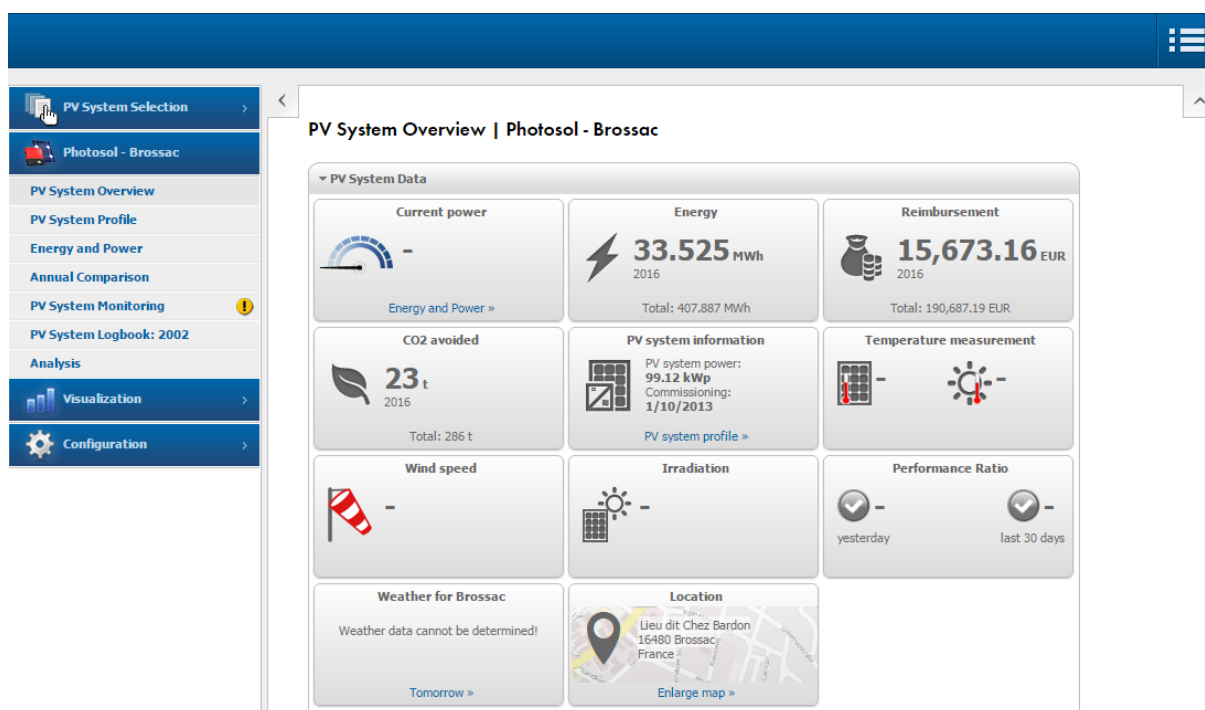


Figura 2-7: Ecrã principal do portal Web “Sunny Portal”.

Esta solução não apresenta custos adicionais face ao custo da instalação FV, uma vez que não é necessário adquirir equipamentos e o acesso ao “Sunny Portal” é gratuito. No entanto, não permite a monitorização da irradiância solar apresentando assim as desvantagens descritas na solução da SolarEdge.

Solar-Log & GE Meter

O sistema de monitorização Solar-Log & GE Meter possibilita a monitorização de qualquer instalação FV monoinversor. Esta solução de monitorização consiste num datalogger (Solar-Log) e num sistema de medição da tensão e corrente (GE Meter) no lado AC da instalação. Estão disponíveis comercialmente três modelos que são ilustrados na Figura 2-8.



Figura 2-8: Solar-Log 350, Solar-Log 360 e Solar-Log 370 respetivamente.

O Solar-Log 350 & GE Meter é compatível com todas as instalações com alguns kW de potência instalada e com uma topologia monoinversor monofásico. Utiliza um cartão SIM para o envio de dados para o portal da Solar-Log, o “Solar-Log® WEB”, sendo necessária a utilização de um cartão GSM e o respetivo pagamento do serviço de dados. A aquisição de um Solar-Log 350 & GE Meter contempla uma oferta de 5 anos para o envio de dados e para a utilização do portal online.

A solução de monitorização Solar-Log 350 & GE Meter não permite a ligação de sensores para medição de variáveis meteorológicas não sendo assim possível a monitorização da irradiância solar em tempo real. Contudo, a Solar-Log dispõe de um serviço para a obtenção da irradiação solar via satélite, serviço que é gratuito por 5 anos. Para a instalação do Solar-Log 350 & GE Meter é necessário interromper o circuito elétrico do lado AC do sistema FV, traduzindo-se num incremento de dificuldade na instalação deste sistema para o utilizador comum.

O Solar-Log 360 & GE Meter além de possibilitar a monitorização da energia produzida pela instalação FV (como no modelo anterior), permite também monitorizar o consumo da habitação onde se encontra a instalação, utilizando para o efeito um transformador de corrente. Esta solução apresenta as mesmas vantagens e desvantagens que o Solar-Log 350 & GE Meter.

O Solar-Log 370 & GE Meter é uma solução mais completa que os modelos apresentados anteriormente, contudo mais dispendiosa. Este equipamento permite a leitura direta (ao nível

do protocolo de comunicação) dos dados do inversor e a ligação de sensores meteorológicos, (da Solar-Log), através de duas portas RS485. Além do custo superior do datalogger, é também necessário adquirir os sensores, o que encarece substancialmente o sistema de monitorização, como apresentado anteriormente no Quadro 2-2.

O portal Web para o qual são enviados os dados é apresentado na Figura 2-9.

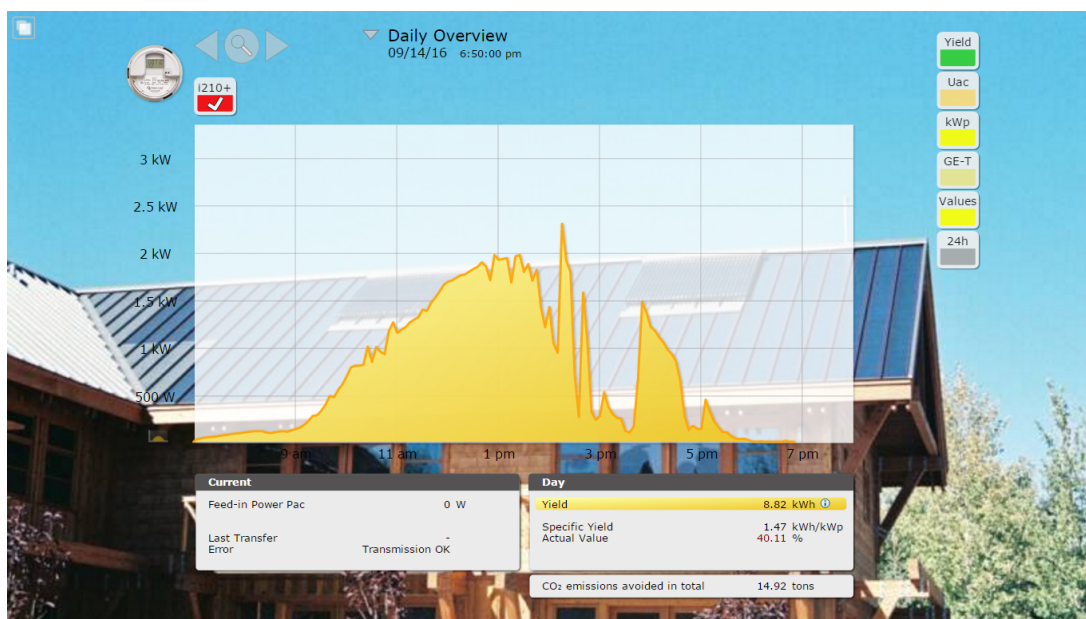


Figura 2-9: Portal Web da Solar-Log.

Rbee Solar

O sistema Rbee Solar permite a monitorização de qualquer instalação FV com alguns kW de potência instalada. Esta solução utiliza o contador de energia Mk7C para a medição da corrente e tensão. Na Figura 2-10 é ilustrado o seu diagrama de funcionamento.

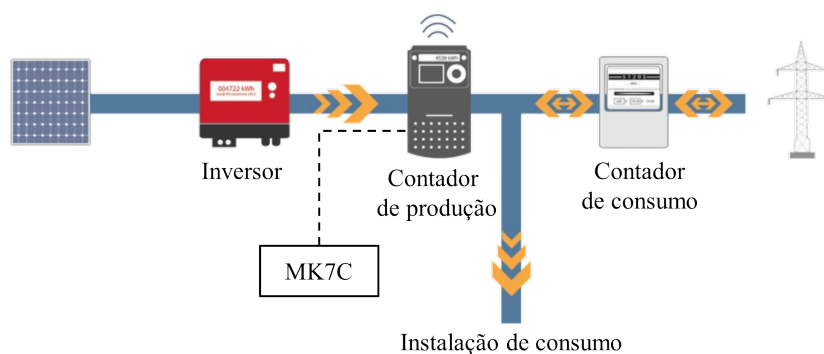


Figura 2-10: Arquitetura de funcionamento do Rbee Solar.

Como é possível verificar pela figura anterior, a instalação do contador Mk7C é feita de forma

invasiva, sendo necessário interromper o circuito no lado AC da instalação FV.

O Rbee Solar não monitoriza a irradiação solar em tempo real, contudo permite a utilização da irradiação solar obtida por satélite (sem custos), com os valores agregados de hora a hora, que são enviados uma vez por dia. Esta situação compromete a identificação de desvios de produção em tempo real.

A aquisição de um sistema Rbee Solar inclui o acesso ao portal online, por 2 ou 5 anos, dependendo da modalidade escolhida. Os dados da instalação FV são enviados a partir do contador de energia Mk7C, 2 vezes ao dia, para o portal Web do Rbee Solar que é mostrado na Figura 2-11.



Figura 2-11: Portal Web do Rbee Solar.

Enphase Envoy

O sistema Enphase Envoy permite apenas a monitorização dos microinversores deste fabricante. Esta solução utiliza um datalogger capaz de monitorizar múltiplos microinversores simultaneamente.

O Enphase Envoy, e de forma similar aos sistemas mencionados anteriormente, envia os dados

recolhidos para o servidor do fabricante, neste caso o Enlighten. Assim, a consulta de dados apenas pode ser feita através deste portal Web (Figura 2-12).

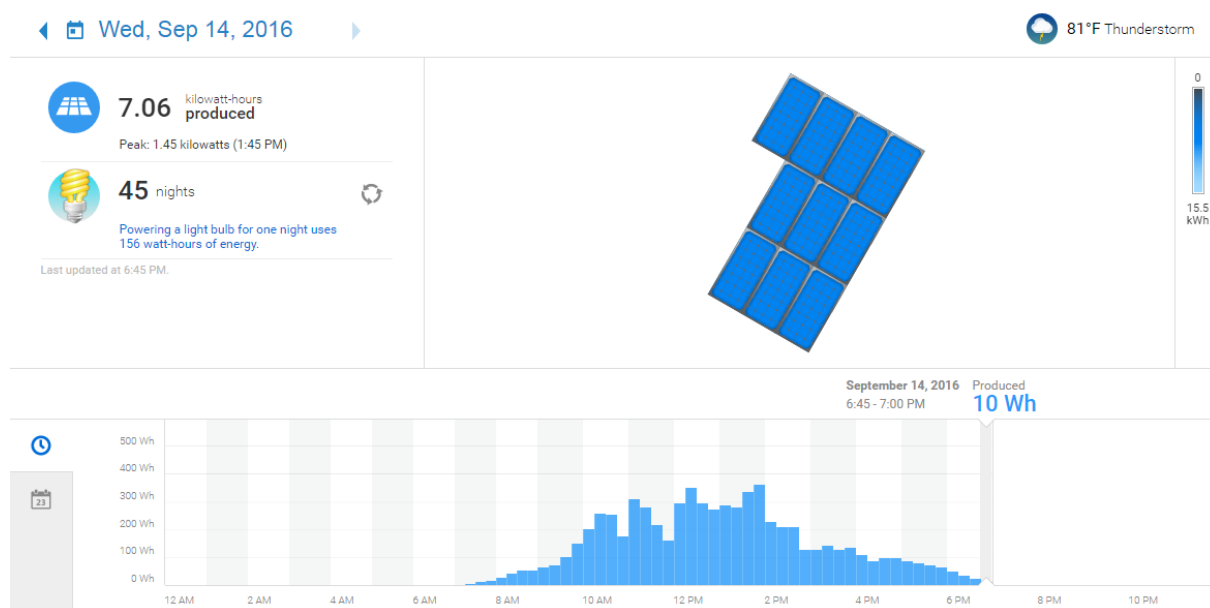


Figura 2-12: Portal Web Enlighten.

Todos os sistemas de monitorização de classe C apresentados anteriormente disponibilizam alertas por correio eletrónico, sobre o funcionamento do sistema monitorizado. A complexidade e utilidade dos alertas varia com o sistema escolhido e com os parâmetros que cada sistema monitoriza.

2.3.4 Equipamentos para Medição de Grandezas Elétricas

Além de todos os sistemas de monitorização apresentados ao longo deste capítulo, existem outras soluções comerciais, de baixo custo, capazes de medir grandezas elétricas. Apesar de serem desenvolvidas para a monitorização de consumos energéticos, estes equipamentos podem ser instalados ou adaptados para monitorizar um pequeno sistema FV. Quando instalados para medição de grandezas AC, estes dispositivos permitem monitorizar a energia produzida por uma instalação FV. Alguns equipamentos permitem o histórico de dados (nos servidores do fabricante) e dispõem de uma interface Web, ainda que simples e limitada. Algumas dessas soluções são apresentadas de seguida.

O Engage Solar Kit possibilita a consulta do valor da energia medida, através da plataforma online da Engage [20]. O dispositivo permite ao utilizador o download dos dados da energia diária produzida. O EmonTx V3 é um equipamento desenvolvido para monitorizar variáveis AC (potência ativa, tensão, corrente e fator de potência) [21]. O Wibeec é um analisador de consumos com ligação wi-fi. É possível consultar dados instantâneos e históricos de consumos da energia elétrica através de um smartphone, tablet ou computador [22]. O TED Home Pro é

um sistema de monitorização de energia que permite, em tempo real, através de um computador, local ou remotamente, a consulta dos consumos energéticos [23].

O hardware utilizado pelos sistemas de monitorização de consumos energéticos é ilustrado na Figura 2-13.



Figura 2-13: Hardware do Engage Solar Kit, EmonTx V3, Wibeec e TED Home Pro respetivamente.

3. Especificações do Sistema de Monitorização

O desenvolvimento do sistema de monitorização obedeceu a determinadas especificações previamente definidas.

Neste capítulo são apresentadas as várias especificações e considerações tomadas durante o desenvolvimento do sistema de monitorização. Algumas especificações são baseadas no que de melhor se pratica nos sistemas de monitorização fotovoltaico, outras são imposições da Martifer Solar, entidade para o qual o sistema foi desenvolvido.

3.1 Parâmetros a Monitorizar nas Instalações FV

A norma IEC-61724 apresenta as principais orientações para a recolha, troca e análise de dados em sistemas FV. Esta norma específica, por exemplo, um conjunto de parâmetros elétricos e meteorológicos que deve ser monitorizado numa instalação FV. Com base nestas orientações e a pretensão do desenvolvimento de um sistema de classe C foram definidos os parâmetros a monitorizar.

Relativamente aos parâmetros elétricos, o sistema teve como requisito a necessidade de monitorizar a potência ativa da instalação, em kW e a energia produzida pela instalação, em kWh.

Uma vez que a produção de energia elétrica de uma instalação FV é diretamente afetada pelas

condições meteorológicas, foi especificado que o sistema monitorizasse alguns parâmetros meteorológicos. Os principais fatores que influenciam a produção FV estão relacionados com a irradiância, os sombreamentos (por nebulosidade, folhas, neve, dejetos de aves), a temperatura, a humidade, o vento e as poeiras. Com base nestes fatores, definiu-se que o sistema fosse capaz de monitorizar a irradiância solar (W/m^2), a temperatura dos módulos FV ($^{\circ}\text{C}$), a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e a humidade relativa (%).

De acordo com o especificado e tal como recomendado na norma IEC-61724, aquisição dos valores da irradiância solar deve ser efetuada em intervalos não superiores a 1 minuto. Para as restantes variáveis, foi especificado que o tempo de aquisição permanecesse entre os 1 e 10 minutos, podendo ser inferior em caso de necessidade. Além disso, todas as variáveis devem ser continuamente monitorizadas durante o período específico da monitorização da instalação.

3.2 Cálculo de Indicadores

O sistema de monitorização deve ser capaz de avaliar o desempenho de uma instalação FV. Para o efeito, devem ser utilizados determinados indicadores.

Relativamente aos indicadores de desempenho, o sistema de monitorização deve calcular: i) o índice de desempenho; ii) a produção específica; iii) e a potência específica.

Dado que a energia produzida por um sistema FV é considerada uma “energia limpa” no que respeita à sua pegada ecológica, é comum nos sistemas de monitorização, disponíveis comercialmente, a existência de indicadores que, de certa forma, traduzem os benefícios que a energia produzida pela instalação FV traz ao meio ambiente. Assim sendo, devem estar presentes no sistema de monitorização os indicadores equivalente de casas abastecidas e a quantidade de CO_2 evitada.

O cálculo dos indicadores, tal como especificado, deve ser efetuado em períodos de 10 minutos.

3.3 Detecção e Alerta de Problemas

O sistema de monitorização deve alertar o utilizador para a existência de avarias e/ou defeitos na sua instalação FV. Estes alertas devem estar disponíveis para consulta através de uma interface gráfica, e deve também ser considerada a possibilidade de o utilizador receber notificações por email relativas aos alarmes ocorridos.

No sistema de monitorização deve estar presente um conjunto de alarmes, que se dividem em

dois grupos: alarmes de produção e alarmes de sistema.

3.3.1 Alarmes de Produção

Os alarmes de produção referem-se à sinalização de problemas existentes na instalação FV que afetam diretamente a produção de energia elétrica. Deste grupo de alarmes fazem parte os alarmes apresentados de seguida.

Instalação FV com baixa produção

Este alarme tem como objetivo alertar o utilizador para o facto de a sua instalação estar com uma produção de energia elétrica inferior ao esperado. O alarme deve ser gerado sempre que se verifiquem simultaneamente as condições 3.1 e 3.2.

$$G > 50 \quad (3.1)$$

$$P_{AC} < P_p \times \frac{G}{G_{STC}} \times 0.75 \quad (3.2)$$

Onde:

- G é o valor da irradiância no momento do cálculo, em W/m^2 ;
- P_{AC} é o valor da potência da instalação, à saída do inversor, no momento do cálculo, em kW;
- P_p é a potência de pico da instalação, em kW;
- G_{STC} é o valor da irradiância nas condições STC ($1000 W/m^2$);
- 0.75 é um coeficiente, definido pela Martifer Solar, para evitar a criação de falsos alarmes.

Inversor Parado

O alarme de inversor parado é gerado quando o inversor da instalação parou de produzir indevidamente, isto é, quando as condições meteorológicas não o justificam. É considerado um alarme de inversor parado caso se verifiquem simultaneamente as condições 3.3 e 3.4.

$$P_{AC} < 10 \quad (3.3)$$

$$G > 50 \quad (3.4)$$

Onde:

- P_{AC} é o valor da potência, à saída do inversor, no momento do cálculo, em W/m^2 ;
- G é o valor da irradiância no momento do cálculo, em W/m^2 .

3.3.2 Alarmes de Sistema

Os alarmes de sistema representam um conjunto de alarmes relacionados com o funcionamento do sistema de monitorização. Para esta secção foi especificado que fosse considerada a existência de alarmes que sinalizassem determinadas falhas relativas ao funcionamento do sistema de monitorização, tais como:

- Detecção de problemas no hardware desenvolvido;
- Detecção de falha de ligação ao servidor FTP;
- Detecção de problemas de desempenho do datalogger desenvolvido, relacionados com a percentagem de utilização do processador e da memória ram.

Outros alarmes considerados relevantes para o óptimo funcionamento do sistema de monitorização, devem estar presentes.

3.3.3 Tempo de ocorrência e deteção de um Problema

O tempo desde a deteção de um problema na instalação FV, por parte do sistema de monitorização, até ao momento em que o utilizador é alertado, é ilustrado pelo fluxograma da Figura 3-1.

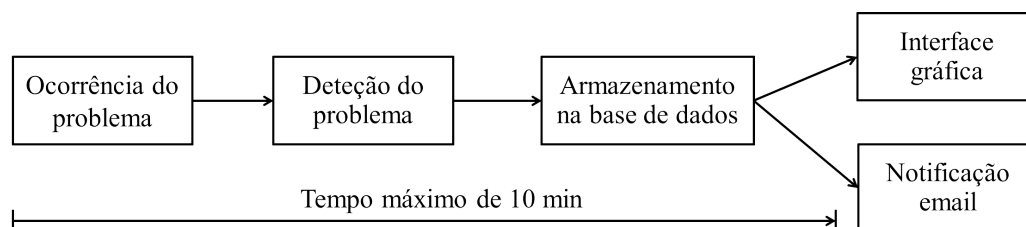


Figura 3-1: Tempo máximo entre a ocorrência e alerta de um problema.

Tal como ilustrado na figura anterior, um alarme deve ser detetado e estar disponível para consulta num período nunca superior a dez minutos em relação ao momento de ocorrência do problema.

3.4 Armazenamento da Dados

O armazenamento de todos os dados recolhidos pelo sistema de monitorização, que inclui os valores de todas as variáveis monitorizadas, os indicadores e os alarmes, deve ser efetuado numa base de dados SQL. A base de dados deve ser dimensionada por forma a garantir um

armazenamento permanente durante um período de, pelo menos, 25 anos.

Os valores das variáveis recolhidas devem ser armazenados na base de dados em períodos de 10 minutos. Uma vez que a aquisição das variáveis é efetuada ao minuto, é necessário proceder à sua agregação. Esta agregação, e de acordo com o tipo de variável, deve ser efetuada como apresentado no Quadro 3-1.

Quadro 3-1: Forma de agregação de variáveis.

Variável	Agregação	Períodos de Agregação
Potência	Média	do minuto 1 até ao 10
Energia	Soma	últimos 10 minutos
Irradiância	Média	do minuto 1 até ao 10
Temperatura	Média	do minuto 1 até ao 10
Humidade Relativa	Média	do minuto 1 até ao 10

Como é possível constatar a partir do quadro anterior, todas as variáveis devem ser agregadas em médias de 10 minutos à exceção da energia, que é incremental. A Norma IEC-61724 define que o cálculo da média em intervalos de 10 minutos, deve ser efetuado do minuto 00:01 até ao minuto 00:10, excluindo o minuto 00:00.

3.5 Interface de Utilizador

Toda a informação da instalação FV deve ser apresentada através de uma interface gráfica. Esta interface deve ser desenvolvida em ambiente Web. Deve também ser possível consultar toda a informação através de um navegador Web, em qualquer dispositivo tais como, computadores, smartphones e tablets.

A interface gráfica deve possibilitar uma interação sem que sejam necessários conhecimentos avançados de informática. O acesso a esta interface deve ser efetuado através de um sistema de autenticação, pelo que devem estar previstos diferentes níveis de acesso, tais como:

- Nível “Convidado”: este utilizador deve ter acesso à informação relativa ao estado atual da instalação;
- Nível “Utilizador”: este utilizador deve ter acesso à informação referente ao estado atual do sistema FV, consultas de histórico de dados e alarmes;
- Nível “Administrador”: um utilizador com este nível de permissões deve ter acesso total ao sistema de monitorização incluindo a possibilidade de adicionar e alterar configurações.

A interface Web deve ser disponibilizada em Português, Inglês e Japonês sendo que o utilizador deve poder escolher a língua de apresentação do sistema. Deve estar presente um conjunto de ecrãs que contenha a seguinte informação:

Painel Inicial

O “Painel Inicial” deve corresponder ao ecrã principal. Neste ecrã deve ser possível fazer uma apreciação global do estado da instalação FV. Deve ainda estar presente, a informação referente à energia produzida, faturação, indicadores de desempenho (tais como o PR), entre outra informação considerada relevante.

Instalação FV

Este ecrã deve conter a informação de cada equipamento monitorizado. Além disso, deve ser considerada a existência de um gráfico que compare a irradiância normalizada com potência específica da instalação FV. Outra informação, tal como o nome da instalação ou a tarifa da energia, poderá estar presente.

Alarmes

No ecrã “Alarmes”, deve ser possível consultar todos os alarmes ativos, assim como o histórico de alarmes ocorridos. Deve também estar disponível a exportação do histórico de ocorrências para um ficheiro csv.

Histórico de Dados

Este ecrã deve possibilitar a consulta de todas as variáveis da instalação FV, graficamente ou através de tabelas. A exportação dos dados para um ficheiro csv deve estar presente.

Configuração da Instalação

No ecrã “Configuração da Instalação” deve ser possível adicionar configurações referentes à instalação FV. Parâmetros como a potência instalada, nome da instalação FV, valor da tarifa da energia são algumas das configurações que devem estar disponíveis.

Definições

No ecrã “Definições”, deve ser possível a configuração de diversos parâmetros relacionados com o sistema de monitorização. Alterar a hora e data do sistema de monitorização, adicionar ou remover utilizadores, ativar notificações de alarmes por email são algumas das configurações que devem estar presentes.

Estado do Sistema

No ecrã “Estado do Sistema” deve estar disponível informação referente ao computador do sistema de monitorização.

3.6 Integração com o Sistema Central de Supervisão da Martifer Solar

O sistema de monitorização deve possibilitar a integração com o sistema central de supervisão da Martifer Solar, designado por OMS. Para isso, deve ser capaz de enviar, com periodicidade de 10 minutos, um ficheiro csv, com os dados atualizados da instalação, para o servidor FTP da Martifer Solar. Este ficheiro deve ser desenvolvido de acordo com as seguintes especificações:

- Nome: o ficheiro deve ser renomeado com a data a que correspondem os dados. Como exemplo, um ficheiro com nome 20150510.csv corresponderá ao ficheiro com dados do dia 10 de Maio de 2015;
- Estrutura: a primeira linha do ficheiro csv deve conter os cabeçalhos. A restante informação deve começar nas linhas seguintes;
- Variáveis: Devem estar presentes pelo menos as variáveis mencionadas nos parâmetros a monitorizar;
- Agregação: Os dados enviados devem corresponder às variáveis agregadas de 10 em 10 minutos.

No Quadro 3-2 é ilustrado um exemplo do que deve ser o ficheiro enviado pelo sistema de monitorização.

Quadro 3-2: Exemplo do ficheiro csv a enviar.

Data	Hora	Variável 1	Variável 2	Variável 3	Variável n
10-05-2015	00:00	x,xx	x,xx	x,xx	x,xx
10-05-2015	00:10	x,xx	x,xx	x,xx	x,xx
10-05-2015	...	x,xx	x,xx	x,xx	x,xx
10-05-2015	23:40	x,xx	x,xx	x,xx	x,xx
10-05-2015	23:50	x,xx	x,xx	x,xx	x,xx

O valor das variáveis deve ter no máximo duas casas decimais. A data e hora devem seguir o formato apresentado no quadro anterior.

4. Sistema de Monitorização Desenvolvido

O sistema desenvolvido permite a sua utilização em todas as instalações FV de pequena dimensão dotadas de um inversor monofásico.

Neste capítulo são apresentadas as diversas fases do desenvolvimento do sistema de monitorização. Apresenta-se, ainda, todo o hardware utilizado na construção do protótipo e o software desenvolvido para a aquisição de dados e para a interface gráfica.

4.1 Arquitetura Implementada

O desenvolvimento do sistema de monitorização contemplou várias componentes de hardware (componente física) e de software (componente lógica).

Relativamente à componente física, foi necessário definir todo o hardware envolvido no projeto. Este hardware engloba um datalogger (constituído pelo computador Raspberry Pi e por uma placa de circuito impressa (PCB) desenvolvida) e um conjunto de periféricos. Na placa PCB são ligados os periféricos, utilizados para a aquisição dos parâmetros definidos no Capítulo 3.1. A Figura 4-1 ilustra a forma como se procede à monitorização destes parâmetros.

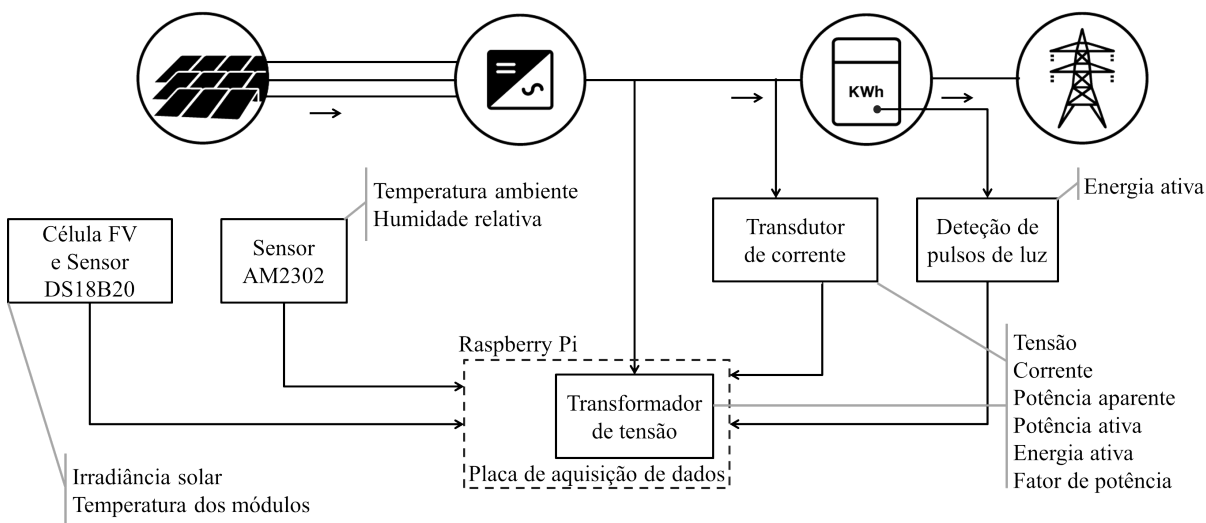


Figura 4-1: Monitorização dos parâmetros elétricos e meteorológicos da instalação FV.

Foi implementada uma solução que pudesse ser transversal a todas as instalações FV com uma topologia monoinversor (monofásico), podendo ser aplicada em instalações já construídas ou a construir.

A monitorização da potência ativa e da energia produzida é efetuada com base nos valores da corrente e da tensão presentes no lado AC da instalação FV. A solução adotada, em detrimento da monitorização do inversor ao nível do protocolo de comunicação, permite, com uma única solução, a possibilidade de monitorizar todos os inversores monofásicos, (incluindo os microinversores), presentes nas pequenas instalações FV.

Foi desenvolvida outra solução que possibilita a monitorização do valor da energia produzida pela instalação FV, utilizando para o efeito um sensor ótico capaz de medir os pulsos de luz emitidos pelo contador de energia (no LED existente para o efeito). Esta solução foi desenvolvida por forma a monitorizar a energia que é, efetivamente, faturada pela entidade a quem é vendida a energia. A utilização do LED do contador para a monitorização da energia está relacionada com o facto de as interfaces de comunicação do contador serem seladas após a sua instalação. Assim sendo, a solução implementada pode ser também aplicada em sistemas FV já existentes. A monitorização da energia ativa através do contador de energia é opcional, podendo o sistema de monitorização funcionar na sua plenitude na ausência da mesma.

A monitorização da irradiância solar é efetuada através de um sensor desenvolvido para o efeito. Os sensores existentes comercialmente, são dispendiosos, fazendo com que o custo total do projeto não cumprisse o seu objetivo e fosse superior a 200€. Assim, a medição da irradiância é realizada com recurso a uma célula FV. Dado que foi especificada a necessidade de monitorizar a temperatura dos módulos FV, foi incluído, na parte de trás da referida célula,

um sensor de temperatura.

A monitorização da temperatura ambiente e da humidade relativa é efetuada com recurso ao sensor AM2302. A escolha deste sensor, está relacionada com a sua robustez e o seu custo reduzido.

Toda a solução de monitorização é descrita, detalhadamente, no decorrer deste capítulo.

Na Figura 4-2 é apresentada a arquitetura implementada, que inclui os vários elementos do sistema, físicos e lógicos.

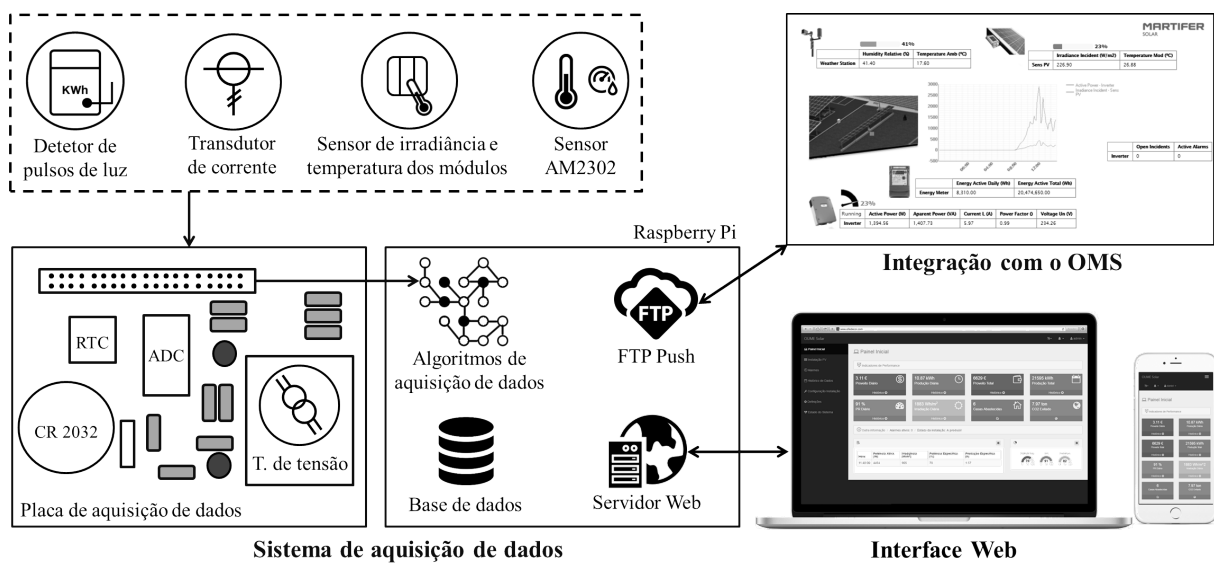


Figura 4-2: Arquitetura do sistema de monitorização desenvolvido.

O desenvolvimento do sistema de monitorização foi dividido em quatro fases: i) desenvolvimento do hardware; ii) desenvolvimento do software de aquisição e armazenamento de dados; iii) desenvolvimento da interface gráfica; iv) e desenvolvimento da interligação com o OMS.

4.2 Hardware Desenvolvido

O sistema de monitorização desenvolvido utiliza o computador Raspberry Pi para a aquisição (através dos vários sensores) e armazenamento de dados. Na Figura 4-3 são ilustrados os sensores utilizados e a forma como estes comunicam com o Raspberry Pi.

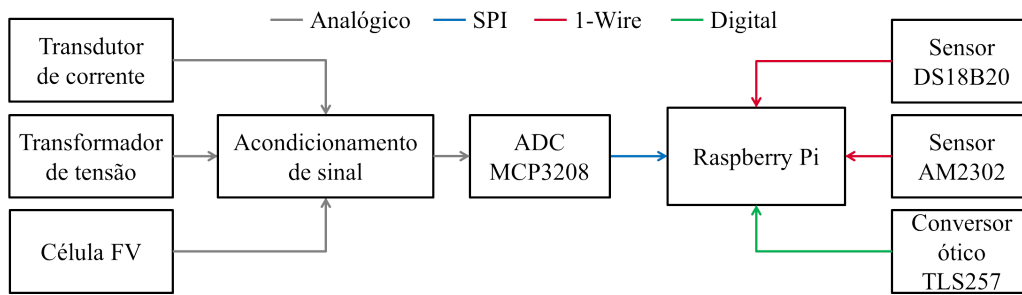


Figura 4-3: Comunicação entre o Raspberry Pi e os periféricos utilizados.

É importante referir que, uma vez que são utilizados sensores com saída analógica, foi necessária a utilização de um conversor analógico-digital, tal como descrito no Capítulo 4.2.2.2.

De seguida são apresentados os principais elementos da componente física do sistema de monitorização.

4.2.1 Computador Raspberry Pi

O Raspberry Pi é a parte central do sistema do monitorização. Este pequeno computador, além de responsável pela recolha e armazenamento dos dados da instalação FV, é também utilizado como servidor Web.

Existem comercialmente vários modelos, tendo sido escolhido o modelo B+ para fazer parte do sistema de monitorização (uma vez que se tratava do modelo mais atual à data de realização deste projeto). A escolha do sistema operativo utilizado, recaiu sobre o Raspbian, uma distribuição Linux baseada em Debian com suporte oficial e recomendada pela fundação Raspberry. Na Figura 4-4 é ilustrado o computador Raspberry Pi utilizado.

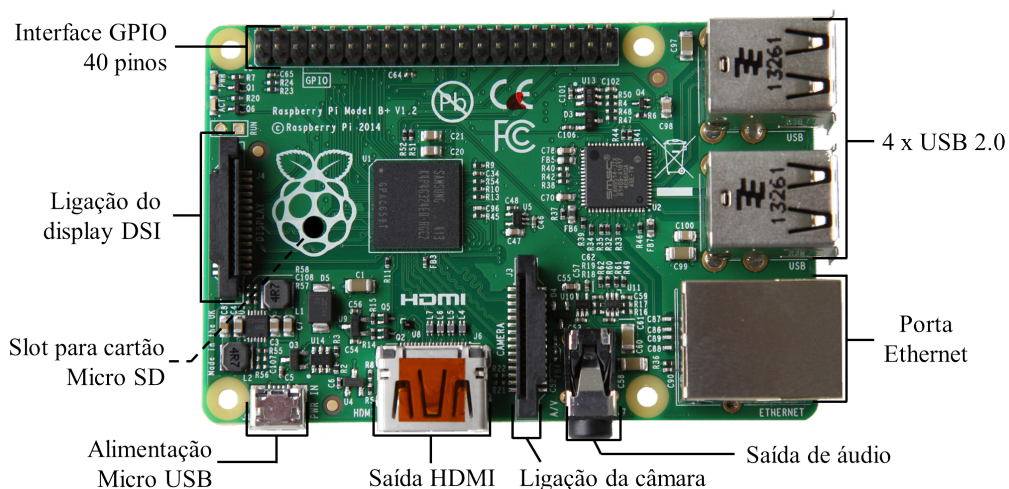


Figura 4-4: Computador Raspberry Pi modelo B+.

O Raspberry Pi possui um conjunto de interfaces de comunicação para a ligação de equipamentos periféricos. Uma das mais importantes é o *General Purpose Input/Output* (GPIO), um conjunto de 40 pinos responsável por fazer a comunicação de entrada e saída de sinais digitais. Esta interface é apresentada em pormenor na Figura 4-5.

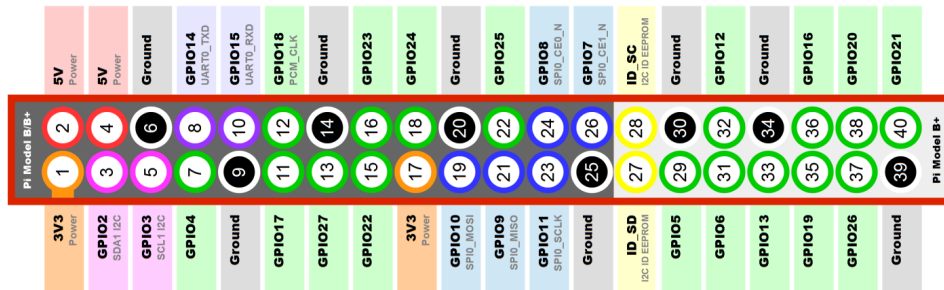


Figura 4-5: Detalhe da interface GPIO do Raspberry Pi.

A placa de aquisição de dados referida é ligada a esta interface. Note-se que o Raspberry Pi não utiliza o sistema TTL, no qual o valor lógico 1 corresponde a 5 V. Efetivamente o nível lógico 1 é representado por um valor de tensão de 3,3 V. Na realidade, o valor lógico é assumido como sendo 1 para tensões superiores ou iguais a 1,3 V e 0 para tensões inferiores a 0,8 V.

4.2.2 Placa de Aquisição de Dados

A placa de aquisição de dados foi concebida para fazer a interface entre os sensores desenvolvidos e o computador Raspberry Pi, através do conector GPIO. É constituída essencialmente por um transformador de tensão, um relógio de tempo real (RTC DS1307), um conversor analógico-digital (ADC MCP3208) e circuitos eletrónicos para acondicionamento de sinal. A Figura 4-6 apresenta a localização dos componentes na placa desenvolvida.

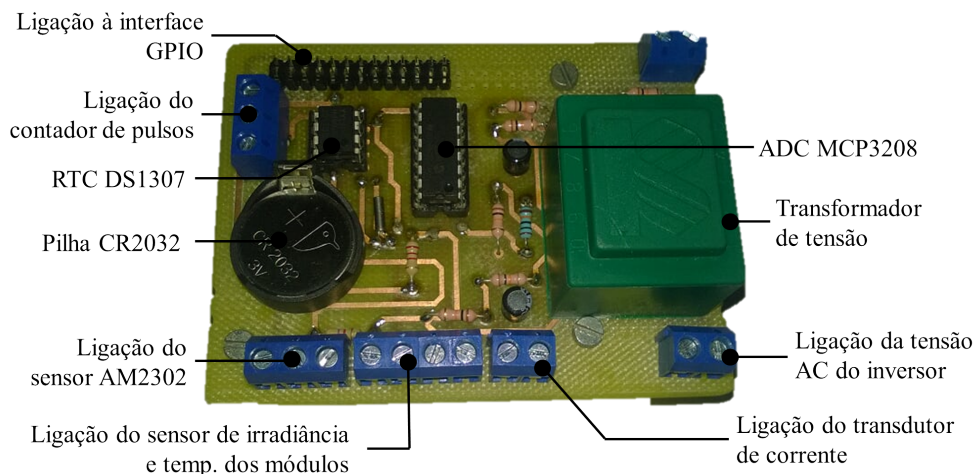


Figura 4-6: Placa de aquisição de dados desenvolvida.

4.2.2.1 Relógio de Tempo Real

Os dados recolhidos pelo sistema de monitorização são armazenados numa base de dados, referenciados à data e hora de aquisição. Para o efeito, é necessária a existência de um relógio adequado. No entanto, o Raspberry Pi foi construído para ser um computador de baixo custo, pelo que algum hardware presente num computador convencional não está presente neste computador. Um exemplo disso prende-se com a não existência de um relógio de tempo real, alimentado por uma bateria, capaz de manter o relógio ativo mesmo quando se desliga o computador.

O Raspberry Pi é capaz de acertar as horas automaticamente, caso esteja ligado à Internet. Contudo, se por alguma razão for desligado e ligado novamente e caso não exista ligação à Internet, o computador perde a sua referência horária. Para contornar este problema foi utilizado o relógio de tempo real *Real Time Clock* (RTC) DS1307. O DS1307 é capaz de calcular precisamente o tempo, realizando a contagem exata dos segundos, minutos, horas, bem como, dos dias, semanas, meses e anos. Os meses com menos de 31 dias e anos bissextos são ajustados automaticamente. Na Figura 4-7 apresenta-se o esquema de ligação utilizado.

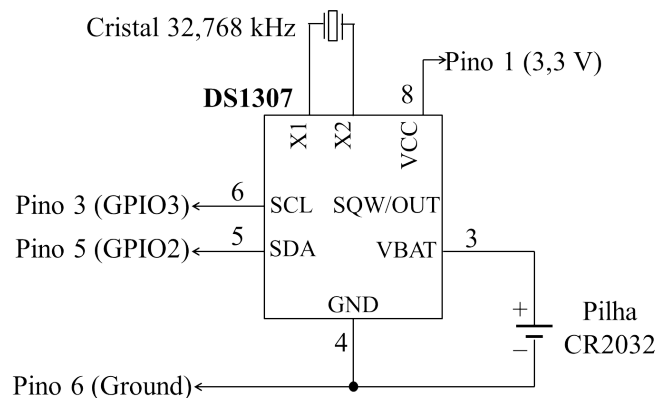


Figura 4-7: Circuito implementado para a ligação do RTC DS1307 ao Raspberry Pi.

Como é possível verificar pela figura anterior, está presente no esquema de ligação uma pilha de 3 V CR2032. Esta pilha permite que o RTC DS1307 continue em operação caso o Raspberry Pi se desligue. O circuito é também constituído por um oscilador a cristal de 32,768 kHz. Na Figura 4-8 é apresentado o hardware utilizado no relógio de tempo real.



Figura 4-8: Hardware utilizado no relógio de tempo real.

A comunicação entre o RTC DS1307 e o Raspberry Pi é efetuada através do protocolo I²C. O GPIO do Raspberry Pi está equipado com pinos dedicados para a ligação I²C, correspondendo o pino 5 (GPIO2) ao Serial Data Line (SDA) e o pino 3 (GPIO3) ao Serial Clock Line (SCL) [24].

4.2.2.2 Conversor Analógico-Digital

O conversor analógico-digital (ADC - *Analogue-to-Digital Converter*) é utilizado para converter os sinais provenientes do transformador de tensão, do transdutor de corrente e da célula FV, tal como ilustrado na Figura 4-3. O Raspberry Pi não dispõe de entradas analógicas no seu GPIO, pelo que foi necessário utilizar este ADC externo. O conversor escolhido, o MCP3208, é um ADC de baixo custo e a sua ligação ao Raspberry Pi não requer componentes adicionais.

O MCP3208 é um ADC de 12 bits com 8 canais, podendo portanto, ler informação analógica de 8 origens distintas, com resolução de 12 bits (4096 valores distintos). Este ADC é capaz de funcionar a velocidades até 100 kbs. No Quadro 4-1 é apresentada a descrição dos pinos presentes no ADC MCP3208.

Quadro 4-1: Descrição dos pinos do MCP3208.

Nome	Função
VDD	Tensão de alimentação: 2,7 V a 5,5 V
DGND	Massa digital
AGND	Massa analógica
CH0-CH7	Entradas analógicas
CLK	Relógio série
D IN	Entrada de dados série
D OUT	Saída de dados série
CS/SHDN	Entrada para iniciar ou desligar a comunicação
V REF	Tensão de referência

Na Figura 4-9 é apresentado o ADC assim como o esquema de ligação utilizado.

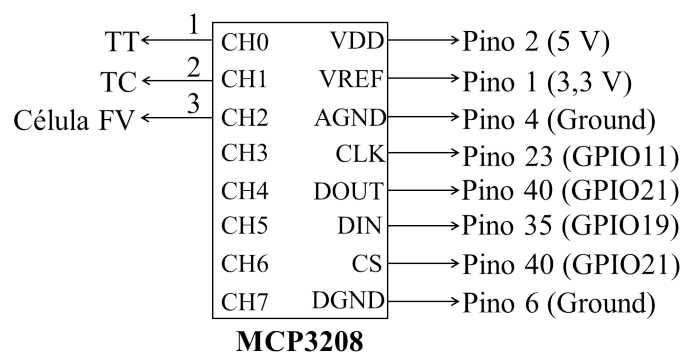


Figura 4-9: Esquema utilizado para a ligação do ADC MCP3208 ao Raspberry Pi.

Como é possível constatar pela Figura 4-9, apenas são utilizados 3 canais analógicos do ADC. O canal 0 (CH0) é utilizado para a leitura da tensão, o canal 1 (CH1) para a leitura da corrente e o canal 2 (CH2) para a leitura da irradiância solar. Na ligação ao Raspberry Pi, o ADC foi alimentado a 5 V. No entanto, a sua tensão de referência VREF foi fixada a 3,3 V para ser compatível com o Raspberry Pi.

A comunicação entre o Raspberry Pi e o ADC é efetuada através do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI). Esta comunicação é feita a partir de três linhas [25] :

- *Master in Slave Out* (MISO): linha do escravo para envio de dados ao mestre;
- *Master Out Slave In* (MOSI): linha do mestre para envio de dados aos dispositivos (escravos);
- *Serial Clock* (SCLK): relógio de sincronização para a transmissão de dados entre o mestre e escravo.

O GPIO do Raspberry Pi está também equipado com pinos dedicados para a ligação SPI. Para estabelecer a ligação entre o computador e o ADC são utilizados os pinos GPIO8 para SS, o GPIO10 para MOSI, o GPIO9 para MISO e o GPIO11 para SCLK.

4.2.3 Hardware para Detecção de Pulsos de Luz

A deteção de pulsos de luz permite contar a energia produzida pela instalação FV a partir da contagem dos pulsos de luz emitido pelo LED presente nos contadores de energia. Estes pulsos são detetados através do conversor ótico de alta sensibilidade TSL257 [26], que é constituído por um fotodíodo e um amplificador operacional.

O TSL257 converte a luz num valor de tensão, sendo que a sua tensão de saída é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente no fotodíodo. Para efeitos de teste, o conversor foi utilizado na deteção do LED (de sinalização de produção de energia ativa) dos contadores Itron SL7000 e Landys+GYR. A tensão de saída do conversor ótico quando os LEDs acenderam foi de 2,8 V DC. Esta tensão permite que a saída do conversor seja ligada a uma entrada digital (GPIO27) do Raspberry Pi. Assim, para cada pulso de luz emitido pelo LED do contador, o conversor vai apresentar na saída um valor de tensão positivo, suficiente para colocar a entrada digital do Raspberry Pi com valor lógico 1.

Dependendo da parametrização do contador de energia, o LED pode piscar uma vez por cada Wh ou por cada kWh medido, entre outros valores possíveis. Assim, o valor de energia produzida, num determinado período, corresponde ao número de vezes em que a entrada digital GPIO27 do Raspberry Pi é colocada com o valor lógico 1, dividindo pelo fator

correspondente ao número de pulsos por kWh de energia. Dado que este fator pode variar de acordo com o contador utilizado na instalação FV, foi prevista, na interface gráfica desenvolvida, uma configuração para a introdução do valor deste fator, expresso em pulsos/kWh.

O algoritmo utilizado para o cálculo da energia é apresentado em detalhe no Capítulo 4.3.2.1.

Na Figura 4-10 está representado o circuito implementado para a ligação do conversor ao Raspberry Pi.

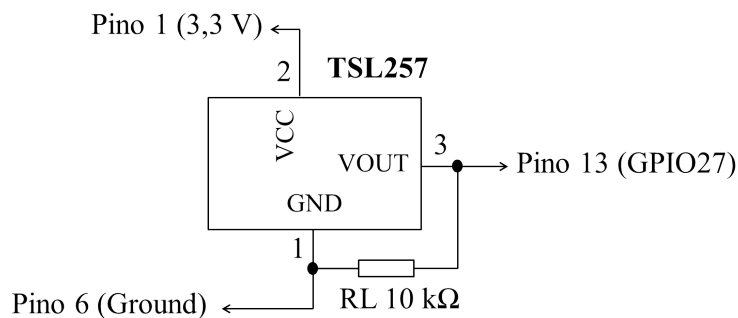


Figura 4-10: Circuito implementado para ligação do TSL257 ao Raspberry Pi.

Como recomendado no manual do conversor TSL257, e exposto na figura anterior, foi adicionada uma resistência de 10 kΩ entre a saída (VOUT) e a massa (GND).

Uma vez que o conversor TSL257 funciona com luz visível, este foi colocado dentro de um invólucro de plástico devidamente selado, evitando que as suas leituras sejam afetadas pela luz exterior, tal como se ilustra na Figura 4-11.



Figura 4-11: Hardware desenvolvido para deteção de pulsos.

4.2.4 Hardware para Medição da Tensão e Corrente

A medição das variáveis AC à saída do inversor é feita utilizando-se um sensor de tensão e um sensor de corrente. Os sinais provenientes destes sensores são acondicionados por forma a respeitarem os limites de tensão exigidos pelo Raspberry Pi. O computador recebe os sinais,

provenientes do ADC, e calcula os valores dos parâmetros elétricos, nomeadamente a tensão, a corrente, a potência ativa, a potência aparente e o fator de potência. De seguida, é apresentado todo o processo de desenvolvimento do referido hardware.

4.2.4.1 Medição da Tensão AC do Inversor

A leitura da tensão à saída do inversor é feita utilizando-se um transformador de tensão (TT). O transformador escolhido foi o PCB TEZ 2,0/D do fabricante Breve-Tufvassons, ilustrado na Figura 4-12. Este transformador foi instalado na placa de aquisição de dados desenvolvida.



Figura 4-12: Transformador PCB utilizado para a medição da tensão.

O transformador apresenta uma tensão estipulada no secundário de 6 V AC quando ao primário é aplicada a tensão estipulada de 230 V AC, (estando o transformador à plena carga). A sua utilização permite que as medições sejam realizadas de forma segura, uma vez que o mesmo fornece isolamento galvânico entre estes dois níveis de tensão.

Para a medição do valor da tensão foi necessário fazer um acondicionamento de sinal, através de componentes eletrónicos presentes na placa de aquisição de dados. O processo de acondicionamento dividiu-se em duas partes: i) baixar a amplitude da onda de tensão no secundário do transformador, por forma a garantir que a tensão na entrada do ADC é inferior à tensão máxima de referência (3,3 V); ii) e adicionar um offset de modo a eliminar a componente negativa da onda de tensão de modo a ter um pico positivo inferior a 3,3 V e um pico negativo superior a 0 V.

O sistema de medição deve ser capaz de lidar com as variações que ocorrem na tensão na tensão nominal da rede. Em Portugal essa tolerância é de $\pm 10\%$ [27], pelo que a tensão nominal da rede pode, em condições normais, oscilar entre 207 e 253 V. Assim sendo, o sistema foi dimensionado para lidar com tensões até 260 V.

O transformador garante a primeira redução da amplitude da onda de tensão. Assumindo o valor de 260 V como a máxima tensão eficaz no primário do transformador, e para efeito práticos, aplicou-se na entrada do transformador 260 V e utilizando-se um multímetro, mediu-se a tensão no seu secundário, obtendo-se 7,9 V. Estes 7,9 V representam o valor eficaz da tensão ou (RMS - *Root Mean Square*) e não o valor de pico, tal como se ilustra na figura 4-13.

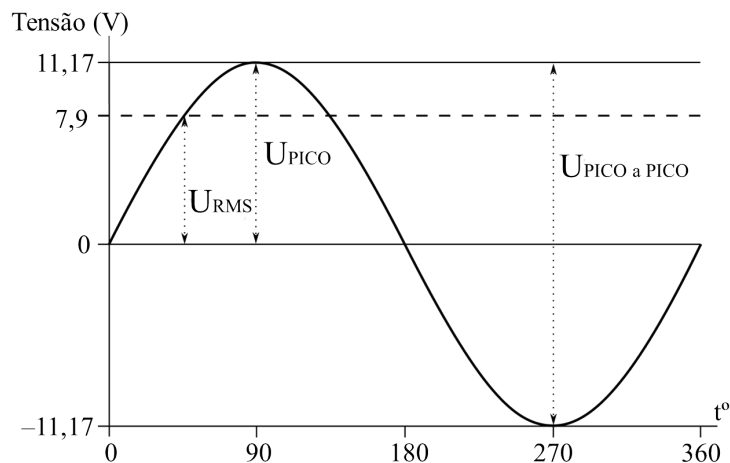


Figura 4-13: Tensão RMS, tensão de pico e tensão pico a pico.

Importa referir que o transformador utilizado não satura para um nível de tensão no primário igual a 260 V.

A tensão de pico no secundário do transformador é dada pela Equação 4.1.

$$U_{pico} = \sqrt{2} \times 7,9 = \pm 11,17 \text{ V} \quad (4.1)$$

A diminuição da amplitude da tensão no secundário do transformador foi feita com recurso a um divisor de tensão. Para a adição do offset foi utilizada uma fonte de tensão criada por outro divisor de tensão ligado entre o pino 1 (3,3 V) e o pino 6 (Ground) do Raspberry Pi. Na Figura 4-14 é mostrado o circuito utilizado, assim como a onda resultante do acondicionamento de sinal.

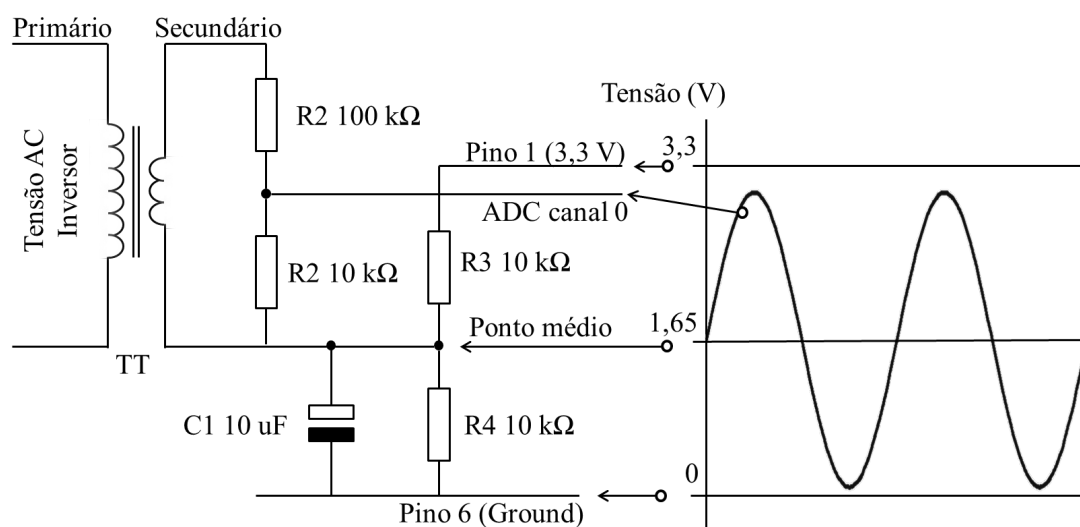


Figura 4-14: Acondicionamento de sinal para a onda de tensão.

As resistências R1 e R2 formam o divisor de tensão que permite baixar a amplitude da onda de tensão à saída do transformador. As resistências R3 e R4 permitem a polarização da tensão fornecendo o offset necessário para eliminar a componente negativa da onda. O condensador C1, de 10 uF, tem o objetivo de reduzir o ruído de alta frequência, uma vez que este proporciona um caminho de baixa impedância para o sinal AC.

Os valores da resistência R1 (10 kΩ) e da resistência R2 (100 kΩ) garantem que a máxima tensão de pico seja sempre inferior a 1,65 V, como mostrado na Equação 4.2.

$$U_{pico} = \frac{10}{100 + 10} \times 11,17 = 1,02 \text{ V} \quad (4.2)$$

As resistências R3 e R4, iguais a 10 kΩ, permitem definir uma tensão de polarização igual a metade da tensão de referência (3,3 V). Tratando-se de uma tensão de 3,3 V a forma de onda resultante tem um pico positivo de 1,65 V + 1,02 V = 2,67 V e um pico negativo de 1,65 V - 1,02 V = 0,63 V satisfazendo assim os requisitos do Raspberry Pi.

A tensão obtida após o acondicionamento, é lida pelo canal 0 do ADC MCP3208. Para isso é utilizado o algoritmo EmonLib [28], como será descrito no Capítulo 4.3.2.2.

4.2.4.2 Medição da Corrente AC do Inversor

A leitura da corrente é feita utilizando-se um transdutor de corrente (TC). A escolha do transdutor teve em consideração o nível máximo de corrente a medir bem como o requisito de se utilizar um TC de baixo custo e não invasivo. Para o protótipo desenvolvido considerou-se uma instalação com um inversor monofásico de 6 kVA de potência estipulada. Neste caso, a corrente mínima que o sensor de corrente deve suportar é dada pela Equação 4.3.

$$I = \frac{6000}{207} = 29 \text{ A} \quad (4.3)$$

Note-se, que se considera já o mínimo valor da tensão nominal da rede que se admite como possível (207 V).

O TC escolhido foi o YHDC SCT-013-030 da XiDi Technology, ilustrado na Figura 4-15, o qual tem a capacidade para medir correntes até 30 A.

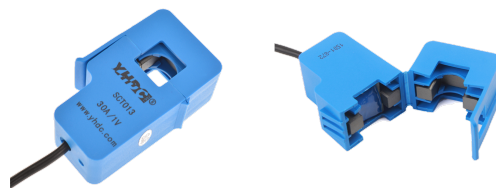


Figura 4-15: Transdutor de corrente YHDC SCT-013-030 da XiDi Technology.

O SCT-013-030 é um transformador de corrente convencional com uma resistência de carga de 62Ω no seu secundário. Esta resistência está dimensionada de modo a fornecer um sinal de tensão (U_{out}) variável entre 0 e 1 V (valor de pico), proporcional à corrente do secundário (I_{sec}) (ver Figura 4-16).

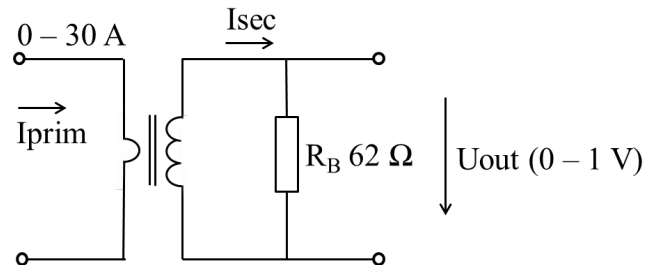


Figura 4-16: Circuito elétrico do SCT-013-030.

O transdutor escolhido permite monitorizar instalações FV até 6 kVA. A monitorização de instalações FV com potências superiores é possível através de outros TCs, do mesmo fabricante, capazes de medir correntes de valores superiores. É possível adotar qualquer um dos TCs presentes no Quadro 4-2.

Quadro 4-2: Modelo dos TCs suportados pelo sistema de monitorização.

Modelo	Corrente de entrada (A)	Sinal de saída (V)
SCT-013-030	0 a 30	0 a 1
SCT-013-050	0 a 50	0 a 1
SCT-013-060	0 a 60	0 a 1
SCT-013-000V	0 a 100	0 a 1

De acordo com o TC utilizado, é necessário configurar o modelo escolhido através da interface gráfica desenvolvida (ver detalhe na secção 5.3.6).

Tal como no caso do sinal de saída do TT, o sinal de saída do transdutor necessitou de ser acondicionado, por forma a respeitar os requisitos do GPIO do Raspberry Pi. Neste caso, a tensão de saída (1 V) já é inferior a 3,3 V pelo que não foi necessário diminuir a sua amplitude. Contudo, foi necessário garantir que a tensão se mantenha positiva entre 0 e a tensão de referência do ADC (3,3 V). O acondicionamento de sinal consistiu em adicionar um offset por forma a eliminar a componente negativa do sinal de saída do TC, evitando que a tensão aos terminais da resistência de carga R_B oscile entre valores de tensão positivos e negativos. Assim, foi utilizado um divisor de tensão como solução, tal como se evidencia na Figura 4-17.

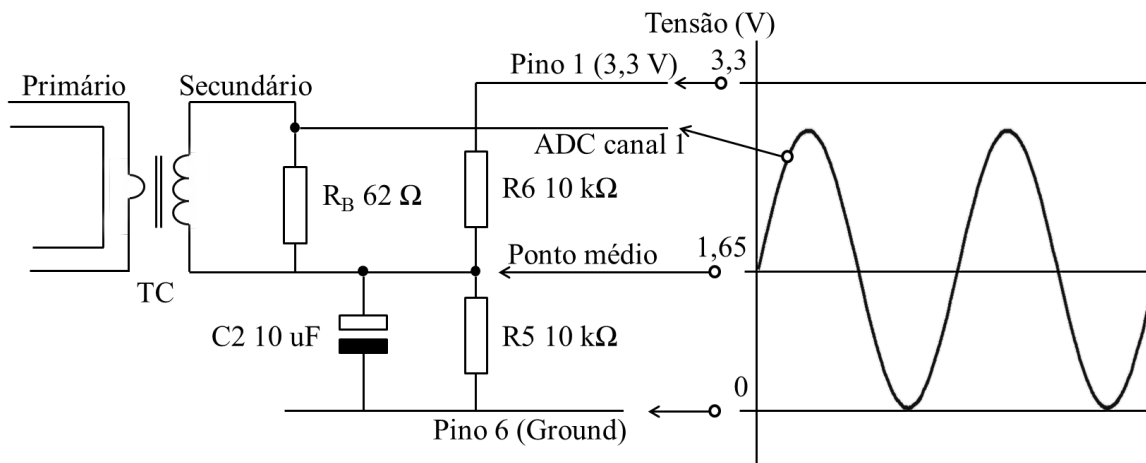


Figura 4-17: Acondicionamento do sinal de saída do transdutor de corrente.

As resistências R5 e R6 da figura anterior permitem que a tensão de saída se encontre em torno de metade da tensão de referência do ADC (1,65 V). Com o objetivo de reduzir o ruído de alta frequência, foi adicionado ao circuito um condensador C2 de 10 μ F.

A tensão obtida, após o acondicionamento, é lida pelo canal 1 do ADC MCP3208. Para o efeito, é utilizado o mesmo algoritmo usado na aquisição do valor da tensão.

4.2.5 Sensor de Irradiância e Temperatura dos Módulos FV

A medição da irradiância é efetuada com recurso a uma célula FV policristalina fabricada pela Martifer Solar. Foi utilizada uma célula de silício policristalino, uma vez que o sistema de monitorização foi testado numa instalação FV constituída por painéis desta tecnologia. Na parte de trás da célula FV está colocado o sensor de temperatura DS18B20, que permite medir a temperatura a que se encontra a célula e que se assume como a temperatura dos módulos FV.

O conjunto desenvolvido é apresentado na Figura 4-18.

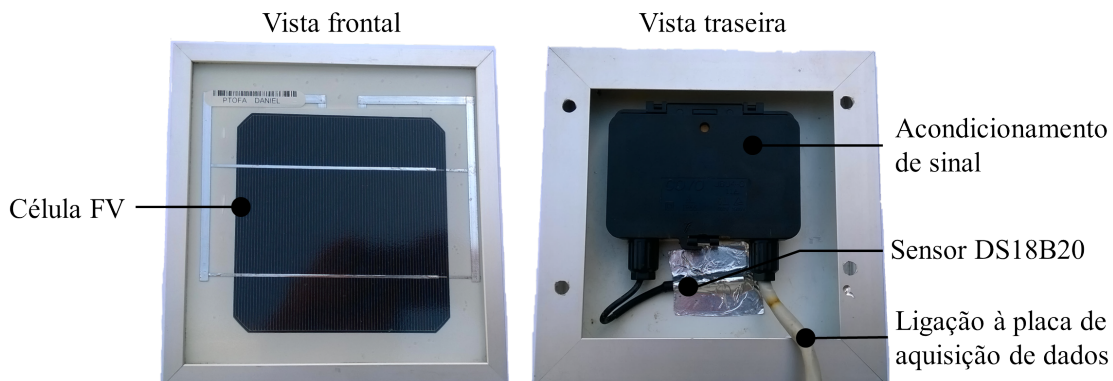


Figura 4-18: Constituição do sensor de irradiância e temperatura dos módulos.

Na parte de trás da célula FV está presente uma caixa estanque utilizada para ligações elétricas. A ligação do sensor FV à placa de aquisição de dados é efetuada a partir de um cabo LiYCY de 4 condutores.

4.2.5.1 Medição da Temperatura

O sensor digital de temperatura DS18B20 mede temperaturas entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ com uma precisão de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperaturas na gama $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. É um sensor muito preciso e permite leituras com uma resolução de até 12 bits. Este sensor, ilustrado na Figura 4-19, é encapsulado, o que o torna à prova de água.



Figura 4-19: Sensor DS18B20 encapsulado.

O DS18B20 comunica através do protocolo 1-Wire, pelo que apenas precisa de uma entrada do Raspberry Pi para transferir os dados. O 1-Wire tem um conceito similar ao do I²C, mas com menor velocidade de transmissão de dados e maior alcance. O esquema de ligação utilizado é ilustrado na Figura 4-20.

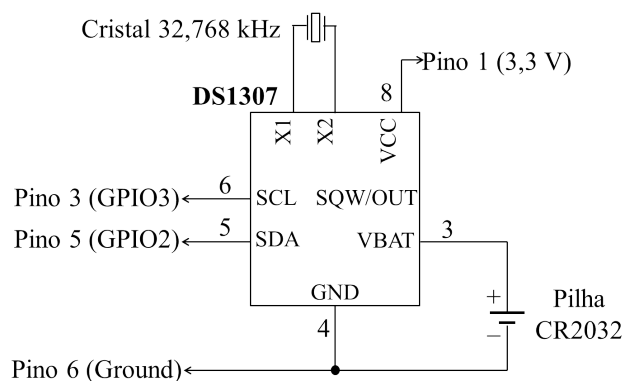


Figura 4-20: Esquema utilizado para ligação do sensor DS18B20 ao Raspberry Pi.

A ligação ao Raspberry Pi é efetuada através do pino 1 e 6 (para alimentação) e do pino 7 (GPIO4) (para transferência de dados).

O algoritmo utilizado para a leitura dos valores da temperatura presentes no sensor é descrito no Capítulo 4.3.2.3.

4.2.5.2 Medição da Irradiância Solar

A irradiância é obtida medindo-se a queda de tensão aos terminais de uma resistência de valor reduzido (R_p), colocada em paralelo com a célula FV, como ilustrado no esquema da Figura 4-21. Esta resistência é percorrida por uma corrente muito próxima à corrente de curto-circuito (I_{sc}) da célula FV, que varia linearmente com a irradiância solar incidente.

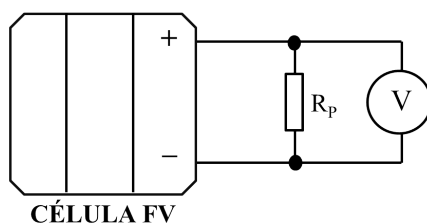


Figura 4-21: Medição da queda de tensão aos terminais da resistência R_p .

Pela análise da característica I-V da célula utilizada é possível verificar que a linearidade da corrente vai diminuindo com o aumento da tensão, como é mostrado na Figura 4-22. Assim, a resistência R_p foi dimensionada para que a queda de tensão medida aos seus terminais não fosse superior a 100 mV, conservando-se assim uma perfeita linearidade, (dado que a corrente fica mais próxima de I_{sc}).

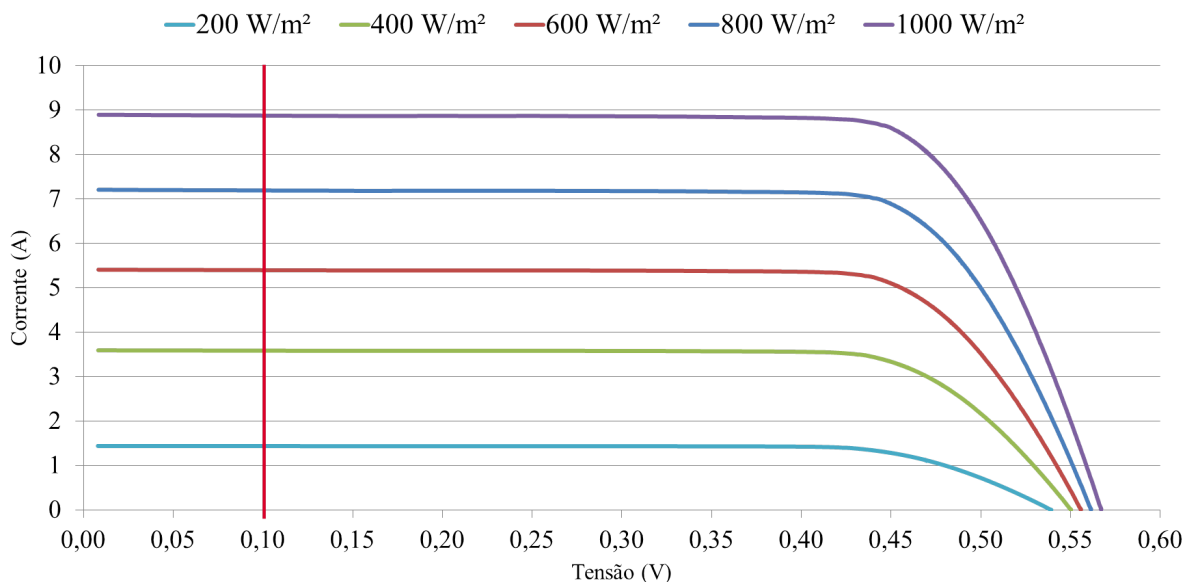


Figura 4-22: Curva I-V da célula utilizada.

Pretende-se obter uma tensão de 100 mV para uma corrente I_{sc} da célula, quando sujeita a uma irradiância de $1000 W/m^2$. Assim sendo, e de acordo com a figura anterior, para uma irradiância

de 1000 W/m^2 , a célula terá uma corrente de $8,874 \text{ A}$. Nestas condições, o valor da resistência R_p , expresso em Ω , é calculado através Equação 4.4.

$$R_p = \frac{0,1}{8,874} = 0,01127 \Omega \quad (4.4)$$

Para obter uma resistência de tão baixo valor, optou-se por usar um pequeno fio de cobre com diâmetro de $0,5 \text{ mm}$. O cálculo do comprimento do fio foi feito com base nas seguintes condições:

- resistividade do cobre (20°C): $0,0172 \Omega\text{m}$;
- secção do cabo $0,19635 \text{ mm}^2$;
- resistência elétrica máxima: $0,01127 \Omega$.

Assim sendo, e de acordo com a Equação 4.5, foi utilizado um fio de cobre com $12,8 \text{ cm}$ de comprimento.

$$L = \frac{0,01127 \times 0,19635}{0,0172} = 0,128 \text{ m} = 12,8 \text{ cm} \quad (4.5)$$

A tensão aos terminais da resistência R_p é ligada entre o canal 2 do ADC e o pino 6 (Ground) do Raspberry Pi, tal como se ilustra na Figura 4-23

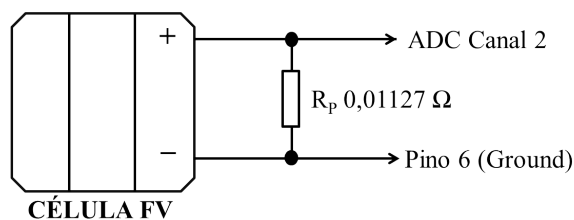


Figura 4-23: Esquema de ligação da Célula FV ao Raspberry Pi.

A explicação detalhada do algoritmo utilizado para a medição do valor da irradiância é apresentada no Capítulo 4.3.2.3.

4.2.6 Sensor de Temperatura Ambiente e Humidade Relativa

A medição da temperatura ambiente e da humidade relativa é feita através do sensor AM2302 da Aosong Electronics. O AM2302 é um sensor digital de baixo custo constituído por um sensor de humidade capacitivo e um termistor para medição da temperatura. No Quadro 4-3 são apresentadas as principais características deste sensor, o qual é ilustrado Figura 4-24.

Quadro 4-3: Características principais do AM2302.

Dimensões	27 mm x 59 mm x 13.5 mm
Tensão de alimentação	3,3-5,5 V DC
Sinal de saída	Sinal digital via interface 1-Wire
Escala de medição	Humidade 0-100%; Temperatura -40 a 80 °C
Taxa de amostragem	0.5 Hz (1 amostra a cada 2 segundos)
Precisão	Humidade $\pm 2\%$; Temperatura $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Resolução	Humidade 0,1%; Temperatura 0,1 °C

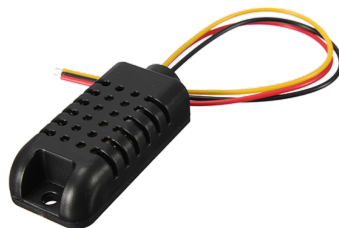


Figura 4-24: Sensor de temperatura ambiente e humidade relativa utilizado.

O esquema de ligação utilizado para a ligação do sensor ao Raspberry Pi é o ilustrado na Figura 4-25.

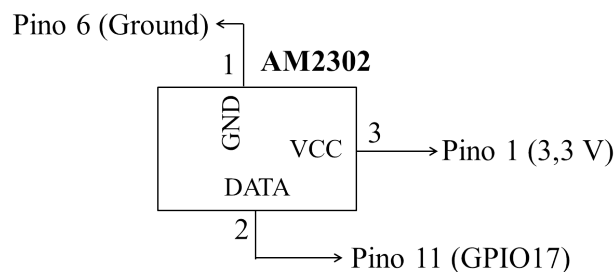


Figura 4-25: Esquema de ligação do sensor AM2302 ao Raspberry Pi.

Para a comunicação com o Raspberry Pi, o AM2302 utiliza o o protocolo 1-Wire, tal como o sensor DS18B20. A saída de dados do sensor é ligada ao GPIO17 do Raspberry Pi. A leitura dos valores provenientes do sensor é efetuada utilizando-se a biblioteca Adafruit_Python_DHT [29]. Este processo é descrito no Capítulo 4.3.2.4.

Dado que não é aconselhado pelo fabricante a utilização deste sensor em ambientes onde as projeções de água sejam uma constante, é aconselhável a instalação deste sensor de tal forma a que não fique exposto a tais condições.

4.3 Software Desenvolvido

O desenvolvimento do sistema de monitorização contemplou também uma componente lógica. Esta componente consistiu no desenvolvimento de um conjunto de software, composto por algoritmos de aquisição dados, algoritmos para deteção de situações de alarme, um algoritmo para envio de notificações por email e um algoritmo de envio de ficheiros para um servidor FTP. Foi também desenvolvido software em linguagem MySQL para agregação de variáveis, cálculo de indicadores e manutenção da base de dados. Por último, foi ainda desenvolvida uma interface Web.

4.3.1 Base de dados MySQL

A base de dados é uma parte fulcral do sistema de monitorização, uma vez que é nela que toda a informação relacionada com a instalação FV é armazenada.

De um modo geral, uma base de dados é gerida por um software designado por Sistema de Gestão de Base de Dados (SGBD). Existem vários SGBDs que podem ser utilizados no sistema operativo Linux. Contudo, foi dada preferência ao sistema MySQL.

4.3.1.1 Estrutura da Base de Dados

A base de dados foi dimensionada por forma a armazenar os dados referentes às variáveis monitorizadas, indicadores de desempenho, alarmes, informação relativa a utilizadores do sistema de monitorização e configurações. Na definição da estrutura da base de dados foi reservada uma tabela para cada tipo de informação. Assim, foram definidas 13 tabelas, divididas em 4 categorias, de acordo com o tipo de informação armazenada:

- Armazenamento das variáveis monitorizadas;
- Armazenamento dos alarmes;
- Armazenamento dos indicadores calculados;
- Armazenamento de acessos ao sistema, configurações e tamanho da base de dados.

No Quadro 4-4 são apresentadas as 4 tabelas que contêm os dados referente às variáveis monitorizadas.

Quadro 4-4: Tabelas da BD dedicadas ao armazenamento das variáveis monitorizadas.

Variáveis			
RawData	AggData	Measures	Equipment
idRawData: BIGINT idEquipment: TINYINT idMeasure: TINYINT Date: DATE Time: TIME Value: DECIMAL	idAggData: BIGINT idEquipment: TINYINT idMeasure: TINYINT Date: DATE Time: TIME Value: DECIMAL	idMeasure: TINYINT Name: VARCHAR Unit: VARCHAR AggType: VARCHAR	idEquipment: TINYINT Type: VARCHAR Name: VARCHAR

A tabela RawData é constituída pelas variáveis armazenadas em períodos de 1 minuto, pelo que contém um elevado número de amostras. Parte do seu conteúdo é eliminado uma vez por dia, mantendo-se apenas os dados do dia corrente e do anterior.

A tabela AggData contém os dados agregados em períodos de 10 minutos da tabela RawData. Tanto a tabela RawData como a AggData relacionam-se com as tabelas Measures e Equipment. Efetivamente, a tabela Measures contém o nome das variáveis e a tabela Equipment o nome dos equipamentos monitorizados.

No Quadro 4-5 estão apresentadas as 4 tabelas referentes ao armazenamento dos alarmes.

Quadro 4-5: Tabelas da BD dedicadas ao armazenamento dos alarmes.

Alarmes			
Events	AlarmDescription	EventEquipment	AlarmStatus
idEvent: BIGINT idAlarm: TINYINT idEquipment: TINYINT Date: DATE Time: TIME idCode: TINYINT idStatus: TINYINT Ack: TINYINT	idDescription: TINYINT Code: VARCHAR Description: VARCHAR Type: VARCHAR	idEquipment: TINYINT Type: VARCHAR Name: VARCHAR	idstatus: TINYINT Description: VARCHAR

A tabela Events é a tabela onde são armazenados os alarmes ocorridos, sendo que as restantes tabelas estão relacionadas com esta tabela. A tabela AlarmDescription contém a descrição dos alarmes, a tabela EventEquipment contém o equipamento a que se refere o alarme e a tabela AlarmStatus contém o estado do alarme (alarme ativo ou inativo).

No Quadro 4-6 estão presentes as tabelas dedicadas ao armazenamento dos indicadores de desempenho calculados.

Quadro 4-6: Tabelas da BD dedicadas ao armazenamento dos indicadores de desempenho

Variáveis	
KPI	KPI Description
idKPI: BIGINT	idDescription: TINYINT
idName: TINYINT	Code: VARCHAR
Date: DATE	Description: VARCHAR
Time: TIME	Type: VARCHAR
Value: DECIMAL	

A tabela KPI armazena todos os indicadores calculados. A tabela KPI_Description está referenciada à KPI e contém o nome do respetivo indicador e outra informação (referente ao indicador) que é utilizada internamente pelo sistema de monitorização.

Além das tabelas anteriormente apresentadas, que contêm os dados da instalação FV monitorizada, estão também presentes outras tabelas auxiliares, que são apresentadas no Quadro 4-7.

Quadro 4-7: Tabelas com informação auxiliar.

Variáveis		
LoginUsers	System	DBSize
idUser: TINYINT	idSystem: TINYINT	idDB: BIGINT
Username: VARCHAR	Name: VARCHAR	Date: DATE
Password: VARCHAR	String: VARCHAR	Time: TIME
Profile: VARCHAR	Notes: TINYTEXT	Value: DECIMAL
Created_Date: DATE		
Created_Time: TIME		

A tabela LoginUsers contém os dados dos utilizadores registados para acederem à plataforma de monitorização. A tabela System contém os dados relativos ao funcionamento interno do sistema de monitorização. Por último, na tabela DBSize é armazenado, periodicamente, o valor do tamanho da base de dados.

A Figura 4-26 resume a relação existente entre as várias tabelas, através de diagramas de classes simplificados.

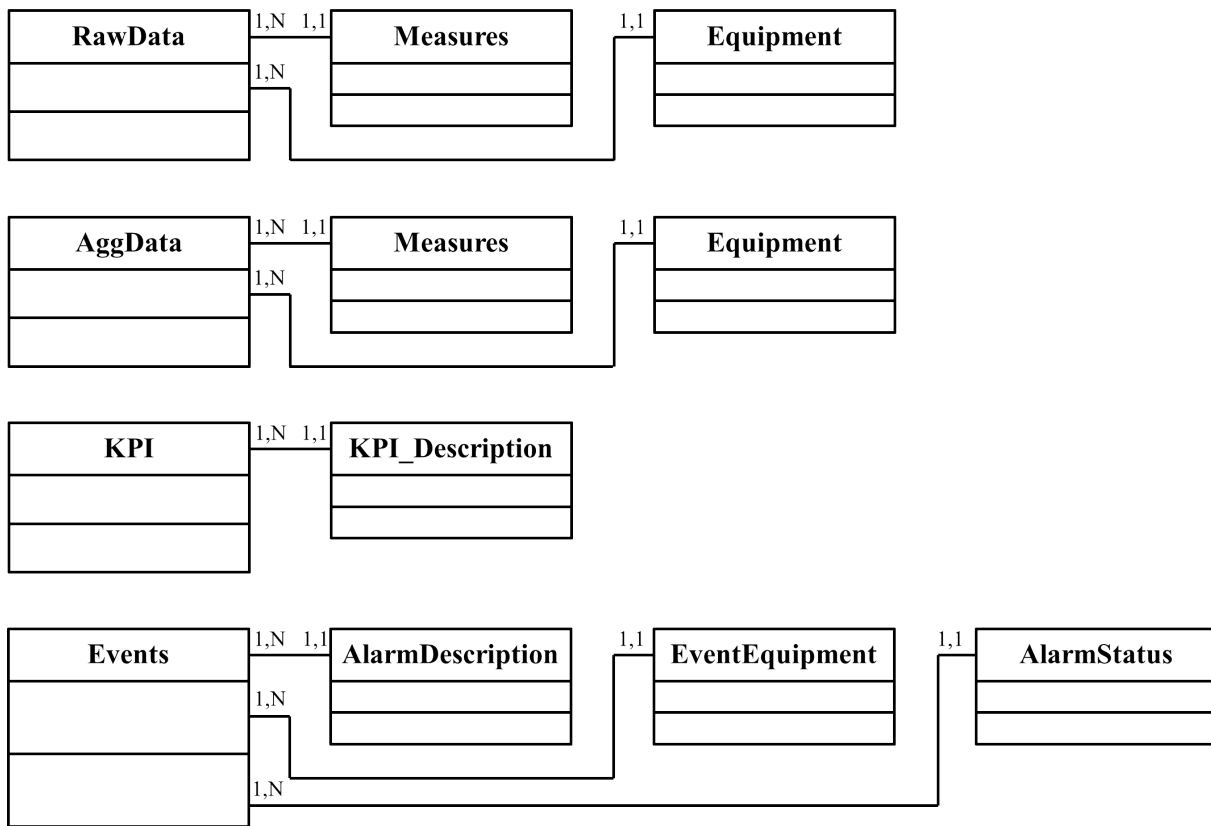


Figura 4-26: Diagrama de classes das tabelas pertencentes à base de dados.

4.3.1.2 Procedimentos MySQL

Durante o desenvolvimento da base de dados foi necessário criar vários procedimentos desenvolvidos em linguagem MySQL (*Stored Procedures*). Estes procedimentos são utilizados para agregar variáveis, eliminar dados, calcular indicadores de desempenho e calcular o tamanho da base de dados, entre outras funções. Foram desenvolvidos os seguintes procedimentos:

- GetAggData: procedimento desenvolvido para agregar, em períodos de 10 minutos, os dados presentes na tabela RawData;
- DelRawData: procedimento utilizado para eliminar os dados da tabela RawData;
- KPI.PR: procedimento utilizado para o cálculo do PR;
- KPI.Yield: procedimento utilizado para o cálculo da produção específica;
- KPI.SpecPower: procedimento utilizado para o cálculo da potência específica;
- KPI.Houses: procedimento utilizado para o cálculo do indicador equivalente de casas abastecidas;

- KPI_CO2: procedimento utilizado para o cálculo do indicador de CO₂ evitado.
- EDaily: procedimento utilizado para calcular a energia diária produzida pela instalação FV com base no valor da potência;
- ETotal: procedimento utilizado para calcular a energia total produzida pela instalação FV com base no valor da potência;
- MeterEDaily: procedimento utilizado para calcular a energia diária produzida pela instalação FV com base na contagem dos pulsos do LED do contador;
- MeterETotal: procedimento utilizado para calcular a energia total produzida pela instalação FV com base na contagem dos pulsos do LED do contador;
- IncomeDaily: procedimento utilizado para calcular a faturação diária;
- IncomeTotal: procedimento utilizado para calcular a faturação total;
- IrraDaily: procedimento utilizado para calcular a irradiação diária;
- DBSize: procedimento utilizado para calcular o tamanho da base de dados.

Todos os procedimentos são executados periodicamente, sendo, para isso, utilizados os eventos do MySQL. Como exemplo, é apresentado o código utilizado para a criação do evento E_DBSize que tem como função executar o procedimento DBSize():

```
CREATE EVENT E_DBSize
ON SCHEDULE EVERY 1 DAY
STARTS (TIMESTAMP (CURRENT_DATE)+INTERVAL 1 DAY+INTERVAL 1 HOUR)
DO
CALL DBSize();
```

4.3.2 Algoritmos de Aquisição de Dados

Os algoritmos de aquisição de dados adquirem e armazenam na base de dados os valores dos parâmetros monitorizados. Para a implementação destes algoritmos foi utilizada a linguagem de programação *Python*.

4.3.2.1 Algoritmo para Contagem de Pulsos de Luz

Este algoritmo foi desenvolvido para a aquisição do sinal proveniente do conversor ótico TSL257, permitindo desta forma monitorizar a energia produzida pela instalação FV. No processo de aquisição do sinal foi utilizada a técnica de interrupções, uma vez que o conversor

ótico o permite, diminuindo-se assim a latência entre o evento e a percepção deste pelo programa. Na Figura 4-27 é mostrado o fluxograma que ilustra o algoritmo desenvolvido.

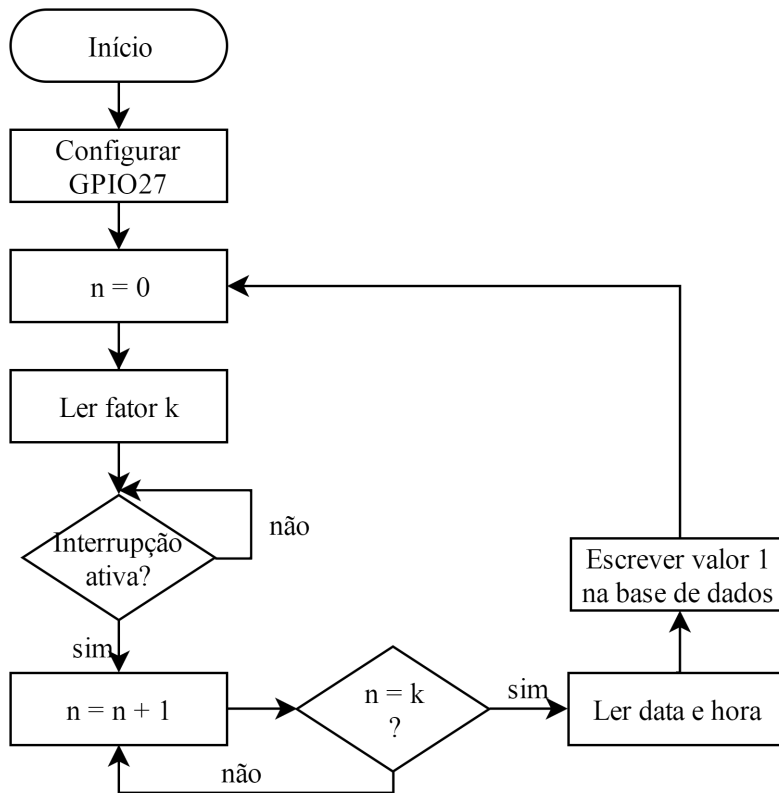


Figura 4-27: Fluxograma do algoritmo para o cálculo da energia ativa.

No desenvolvimento deste algoritmo, foi utilizada a biblioteca RPi.GPIO que possibilita o acesso à interface GPIO do Raspberry Pi.

O programa começa por configurar o canal GPIO27 para funcionar através de interrupções, sendo de seguida inicializada a variável “n” com o valor 0. Após a conclusão destas instruções, é lido na base de dados o valor do fator de multiplicação (k) do contador de energia (introduzido pelo utilizador através da interface gráfica desenvolvida). O programa encontra-se agora a aguardar por uma interrupção, isto é, que o conversor TSL257 coloque a entrada digital GPIO27 com nível lógico 1 (um pulso de luz).

Após a ocorrência de uma interrupção, a variável “n” é incrementada, sendo depois comparada com o fator k. Esta condição previne que, por exemplo, no caso de um k = 1000, (correspondente a 1000 impulsos por kWh de energia), sejam escritos na base de dados 1000 valores de energia para apenas um kWh produzido, diminuindo o processamento. Assim, apenas é guardado um valor da energia quando já foi produzido 1 kWh.

Caso a condição n = k não se verifique, o programa volta a aguardar por uma interrupção. No

caso de a condição ser verdadeira é escrito o valor 1 na base de dados (correspondente a 1 kWh), devidamente referenciado ao equipamento em causa (o contador) e ao momento de aquisição (data e hora).

Note-se que os valores da energia total e da energia diária, mostrados na interface gráfica, são calculados utilizando-se os procedimentos MySQL MeterEDaily e MeterETotal. Estes procedimentos somam os valores “1” armazenados na base de dados, ao qual adicionam o valor offset de energia, (caso exista).

4.3.2.2 Algoritmo para a Aquisição das Variáveis AC

Este algoritmo foi desenvolvido para a cálculo dos sinais provenientes do transformador de tensão e do transdutor de corrente e o cálculo dos diversos parâmetros AC. Para o efeito é utilizada a biblioteca EmonLib [28], que é responsável pelo cálculo do valor da tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, fator de potência e potência aparente. A Figura 4-28 ilustra, de forma resumida, o algoritmo utilizado.

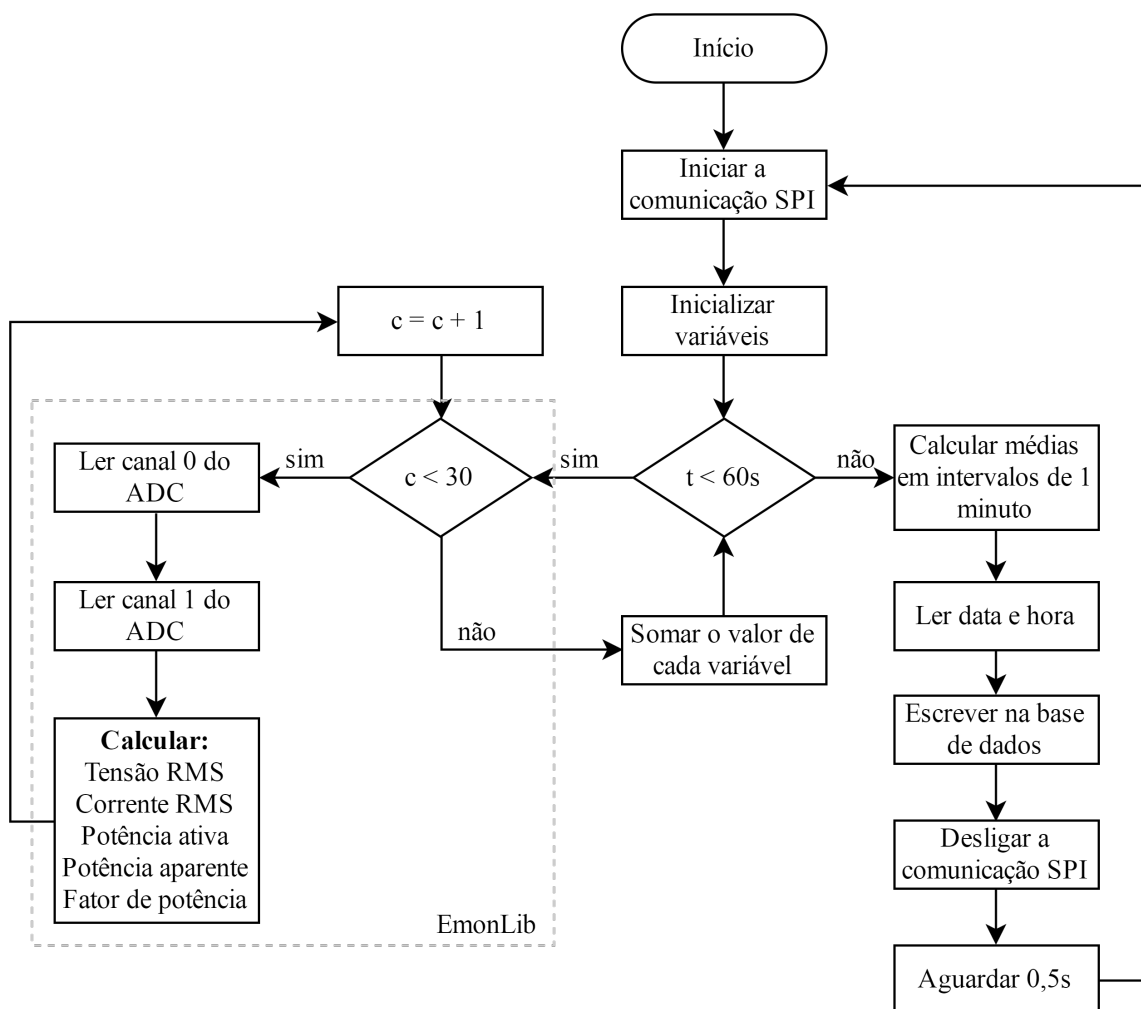


Figura 4-28: Fluxograma do algoritmo para a aquisição dos parâmetros AC.

Na implementação do algoritmo foi utilizada a biblioteca Spidev, que possibilita a interface com o barramento SPI do Raspberry Pi permitindo, assim, a leitura dos canais do ADC.

Primeiramente, são inicializadas várias variáveis utilizadas para alimentar a biblioteca EmonLib, das quais se destacam a “Vcal” e a “Ical”. Estas variáveis são de extrema importância para a correta aquisição dos valores da tensão e corrente e, conseqüentemente, do cálculo dos restantes parâmetros AC.

O programa decorre com a leitura dos valores instantâneos presentes no canal 0 e no canal 1 do ADC. A onda de tensão presente no canal 0 e a onda de corrente presente no canal 1 são amostradas com uma frequência de 1,5 kHz, o que permite recolher 30 amostras por cada período de onda. A cada amostra são calculados (pela biblioteca EmonLib) todos os parâmetros AC. Após este processo, (que ocorre 30 vezes) é calculada a média dos 30 valores de cada parâmetro. O cálculo desta média é efetuado uma vez a cada segundo.

Os parâmetros AC, calculados a cada segundo, são de seguida agrupados em médias de um minuto. Estes valores são depois armazenados na base de dados, devidamente referenciados ao momento de aquisição (date e hora) e ao equipamento (inversor).

Por último, é fechado o barramento SPI e após 0,5s, o processo é reinicializado.

Importa salientar a importância das variáveis “Vcal” e “Ical”, as quais permitem calibrar o valor da tensão RMS e da corrente RMS, respetivamente. A biblioteca EmonLib atribui a estas variáveis um valor por omissão. Contudo, é necessário ajustar estes valores, dado que são introduzidos erros pelo hardware desenvolvido (na utilização do transformador de tensão, do transformador de corrente, e dos respetivos componentes eletrónicos utilizados para o acondicionamento de sinal). As variáveis “Vcal” e “Ical” foram ajustadas através da comparação dos valores da corrente eficaz e tensão eficaz obtidos pelo sistema de monitorização desenvolvido (utilizando-se “Vcal” e “Ical” por omissão) com os valores obtidos por um multímetro devidamente calibrado.

4.3.2.3 Algoritmo para a Aquisição da Irradiância e Temperatura

Este algoritmo é responsável pelo cálculo da irradiância solar e pela leitura da temperatura da célula proveniente do sensor DS18B20. Na Figura 4-29 é ilustrado o fluxograma do algoritmo desenvolvido.

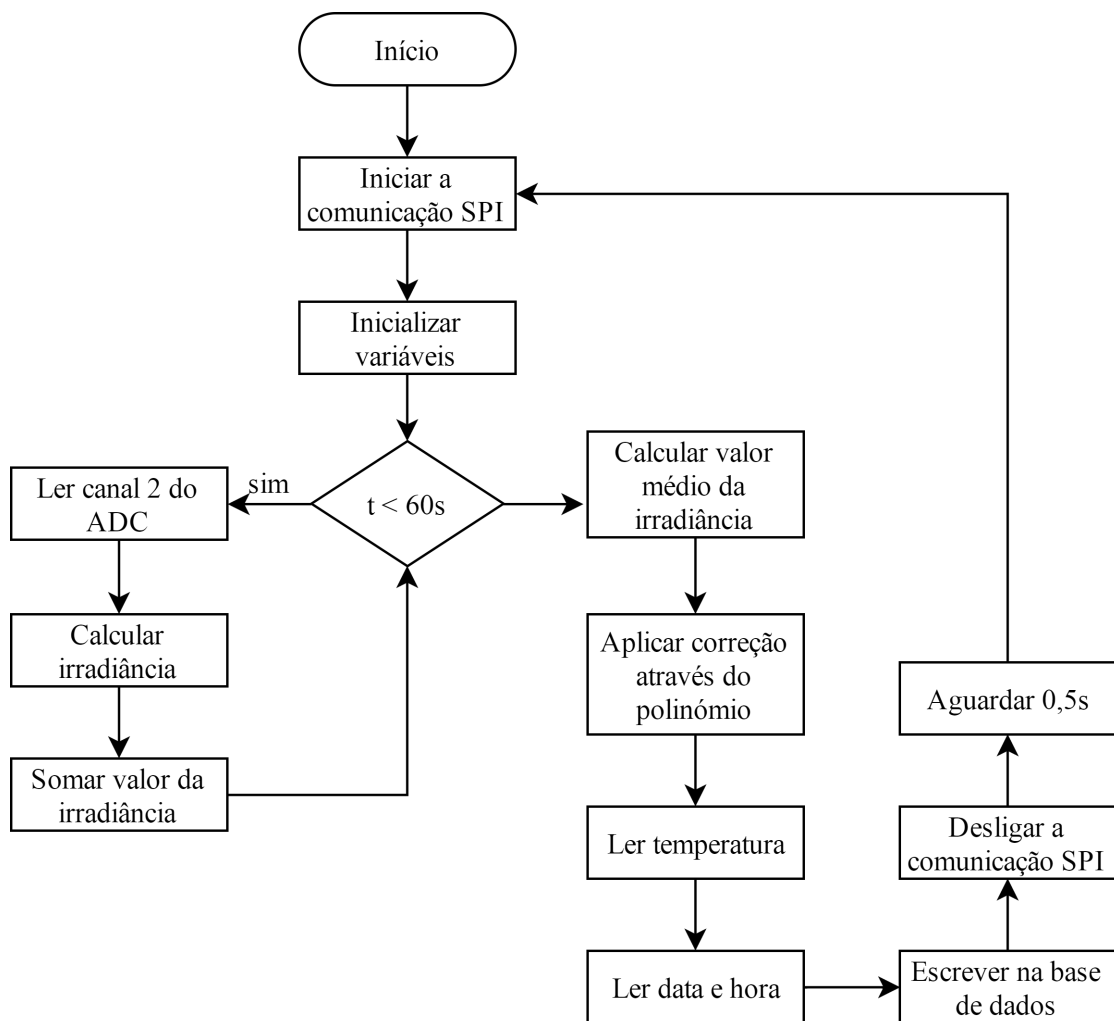


Figura 4-29: Fluxograma do algoritmo para a aquisição da irradiância solar e da temperatura dos módulos FV.

O programa inicia-se com a configuração da comunicação SPI (utilizando-se a biblioteca Spidev). De seguida, são inicializadas diversas variáveis que são utilizadas no decorrer do programa.

O programa prossegue com a leitura do valor presente no canal 2 do ADC. Após a leitura, é efetuado o cálculo do valor da irradiância solar em W/m^2 , utilizando-se a Equação 4.6.

$$Irr = \frac{CH2 \times 3,3 \times 1000}{4095 \times 0,1} \quad (4.6)$$

Onde:

- $CH2$ é o valor presente no canal 2 do ADC, no momento do cálculo;
- 3,3 é o valor da tensão de referência do ADC, em V;
- 0,1 representa os 100 mV;

- 1000 é o valor da irradiância solar nas condições STC (1000 W/m^2);
- 4095 é o valor digital correspondente aos 100 mV, em V.

A máxima tensão lida pelo ADC é de 100 mV, o que corresponde a 124 valores digitais do ADC, de um total de 4095 (3,3 V). Por consequência, o valor da irradiância calculada apresenta uma resolução de 8 W/m^2 .

O processo de cálculo do valor da irradiância é repetido durante 60s, em intervalos de 1s, sendo depois calculada a média dos valores de irradiância obtidos neste período.

O valor médio da irradiância, calculado até então, consiste num valor teórico. Para averiguar a qualidade dos valores adquiridos pelo sensor de irradiância desenvolvido fez-se uma comparação entre estes valores e os obtidos através do medidor de curvas IV I-V400 da HT Instruments, para o dia 04-08-2015.

Na Figura 4-30, é possível verificar que os valores de ambas as curvas de irradiância apresentam algumas diferenças.

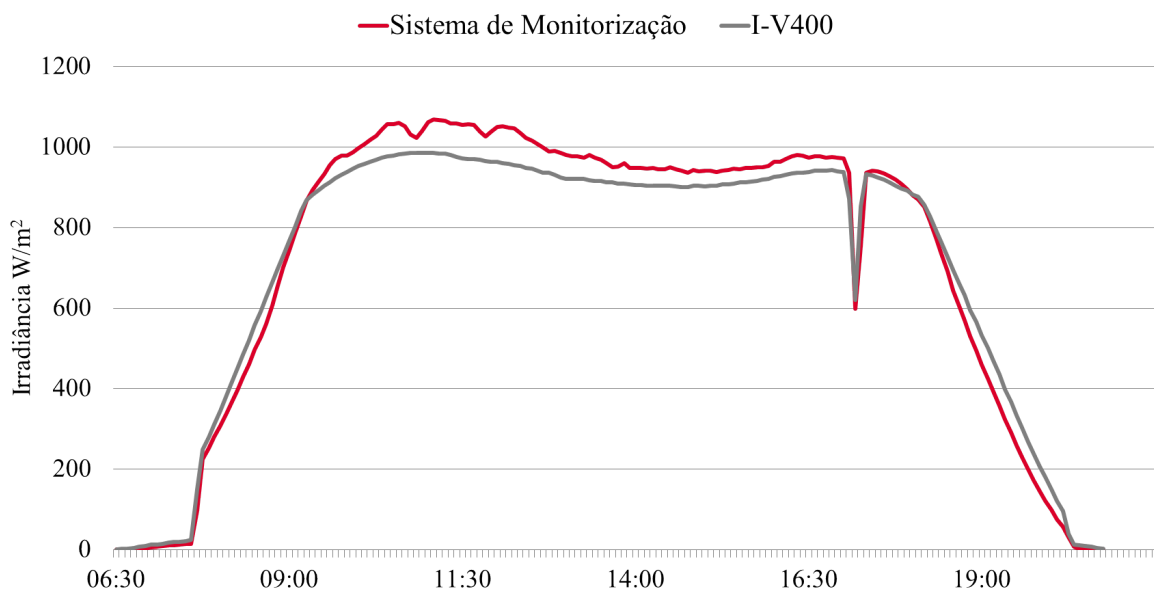


Figura 4-30: Comparação dos valores da irradiância solar para o dia 04-08-2015.

Como solução para o problema encontrado, o valor médio da irradiância é corrigido através de um polinómio de grau 3. Este polinómio resulta da análise do histórico da irradiância, referente ao dia 04-08-2015, obtido pelo sistema de monitorização desenvolvido e pelo medidor de curvas IV. Através da comparação de valores foi possível obter a função que melhor traduz a relação entre as duas curvas presentes na figura anterior, tendo-se obtido a Equação 4.7.

$$Irr_{final} = -0,00000001569 \times Irr_{m\u00e9dio}^3 - 0,000332898 \times Irr_{m\u00e9dio}^2 + 1,285859468 \times Irr_{m\u00e9dio} + 7,700510274 \quad (4.7)$$

Onde:

- $Irr_{m\u00e9dio}$ é o valor m\u00e9dio da irradi\u00e2ncia, em intervalos de 60s.

A compara\u00e7\u00e3o entre os valores da irradi\u00e2ncia resultante ap\u00f3s a corre\u00e7\u00e3o e os valores obtidos pelo medidor I-V400 \u00e9 mostrada na Figura 4-31.

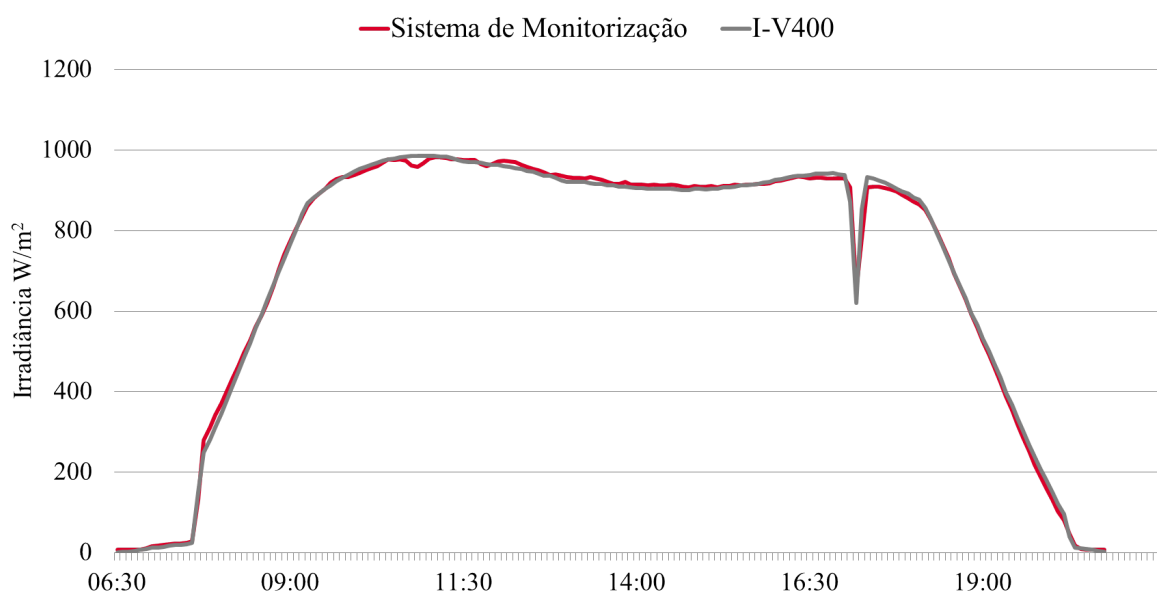


Figura 4-31: Compara\u00e7\u00e3o dos valores da irradi\u00e2ncia solar para o dia 04-08-2015 ap\u00f3s a corre\u00e7\u00e3o.

Ap\u00f3s o c\u00e1lculo da irradi\u00e2ncia, \u00e9 lida a temperatura presente no sensor DS18B20. Esta temperatura traduz a temperatura a que se encontra a c\u00e9lula FV e, conseq\u00fcentemente, a temperatura (aproximada) a que se encontram os m\u00f3dulos FV da instala\u00e7\u00e3o monitorizada.

Por \u00faltimo, s\u00e3o armazenados os valores da irradi\u00e2ncia solar e da temperatura dos m\u00f3dulos FV na base de dados, devidamente referenciados \u00e0 data e hora de aquisi\u00e7\u00e3o e ao equipamento. Ap\u00f3s 0,5s o processo repete-se.

4.3.2.4 Algoritmo para a Aquisi\u00e7\u00e3o da Humidade Relativa e da Temperatura Ambiente

Este algoritmo, cujo fluxograma \u00e9 ilustrado na Figura 4-32, \u00e9 respons\u00e1vel pela leitura dos valores da humidade relativa e da temperatura ambiente provenientes do sensor AM2302.

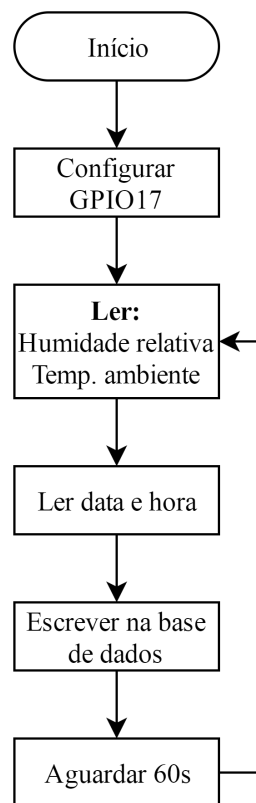


Figura 4-32: Fluxograma do algoritmo utilizado para a aquisição da humidade relativa e da temperatura ambiente.

Na implementação deste algoritmo foi utilizada a livreria `Adafruit_Python_DHT`, utilizada para ler os dados presentes no sensor AM2302 e convertê-los em valores de humidade relativa e de temperatura ambiente.

O programa inicia-se com a ativação do canal digital utilizado para a ligação do sensor ao Raspberry Pi (GPIO17). Seguidamente, são lidos os valores da humidade relativa e da temperatura ambiente presentes no sensor.

Após a leitura no sensor AM2302, são armazenados, na base de dados, ambos os valores das variáveis, com a sua correspondente data e hora e equipamento (sensor ambiente). Após 60s o processo é repetido, (à exceção da configuração da porta GPIO17), uma vez que a aquisição das variáveis é efetuada uma vez a cada minuto.

4.3.3 Alarmes

Foram desenvolvidos diversos algoritmos para registar e sinalizar a ocorrência de falhas ou defeitos, tanto da instalação FV como do sistema de monitorização. Relativamente aos alarmes de produção foi desenvolvido um algoritmo para sinalizar a ocorrência de situação de baixa produção e de inversor parado, tal como se mostra na Figura 4-33.

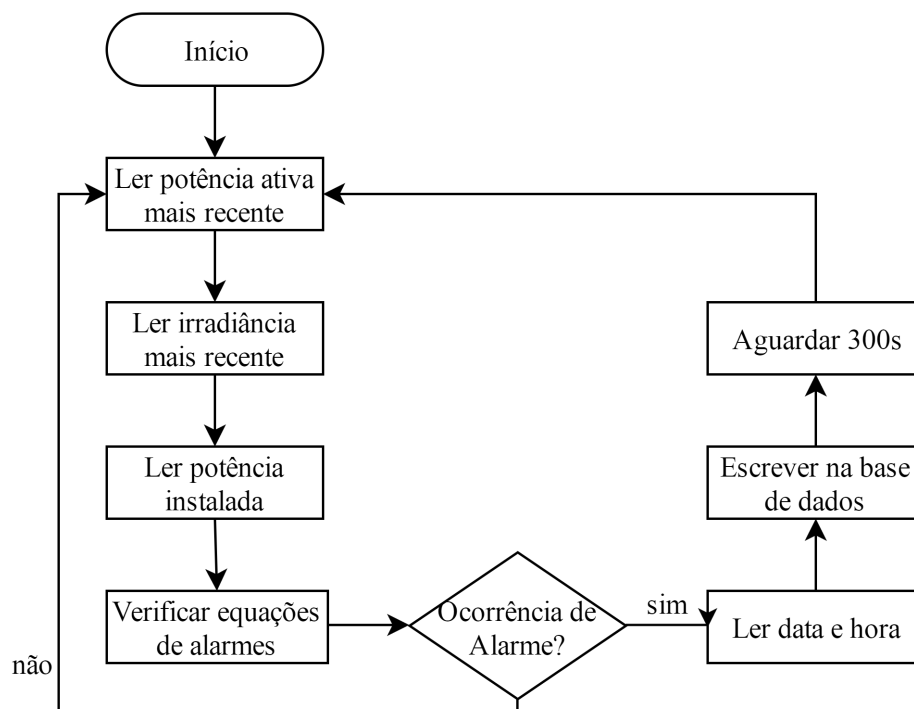


Figura 4-33: Fluxograma do algoritmo dos alarmes de produção.

O programa é iniciado com a leitura, na base de dados, dos valores mais recentes da potência ativa e da irradiância solar. De seguida, é lido o valor da potência instalada do sistema FV monitorizado.

Imediatamente a seguir, é verificado se existem problemas na instalação FV. Para o efeito, são analisadas as equações presentes na secção 3.3.1. Caso seja identificada alguma ocorrência de problemas, é armazenado na tabela Events o(s) alarme(s) ocorrido(s) referenciados com a respetiva data e hora. Este processo é repetido após 300s.

Para além da deteção de situações de alarme, foi implementado um processo de notificação da ocorrência de alarmes por email. Este processo é paralelo e independente do algoritmo anterior. Assim, foi desenvolvido um algoritmo que é responsável por notificar o utilizador, através do envio de um email, da existência de ocorrências de alarmes. Na Figura 4-34 é ilustrado o fluxograma do algoritmo desenvolvido.

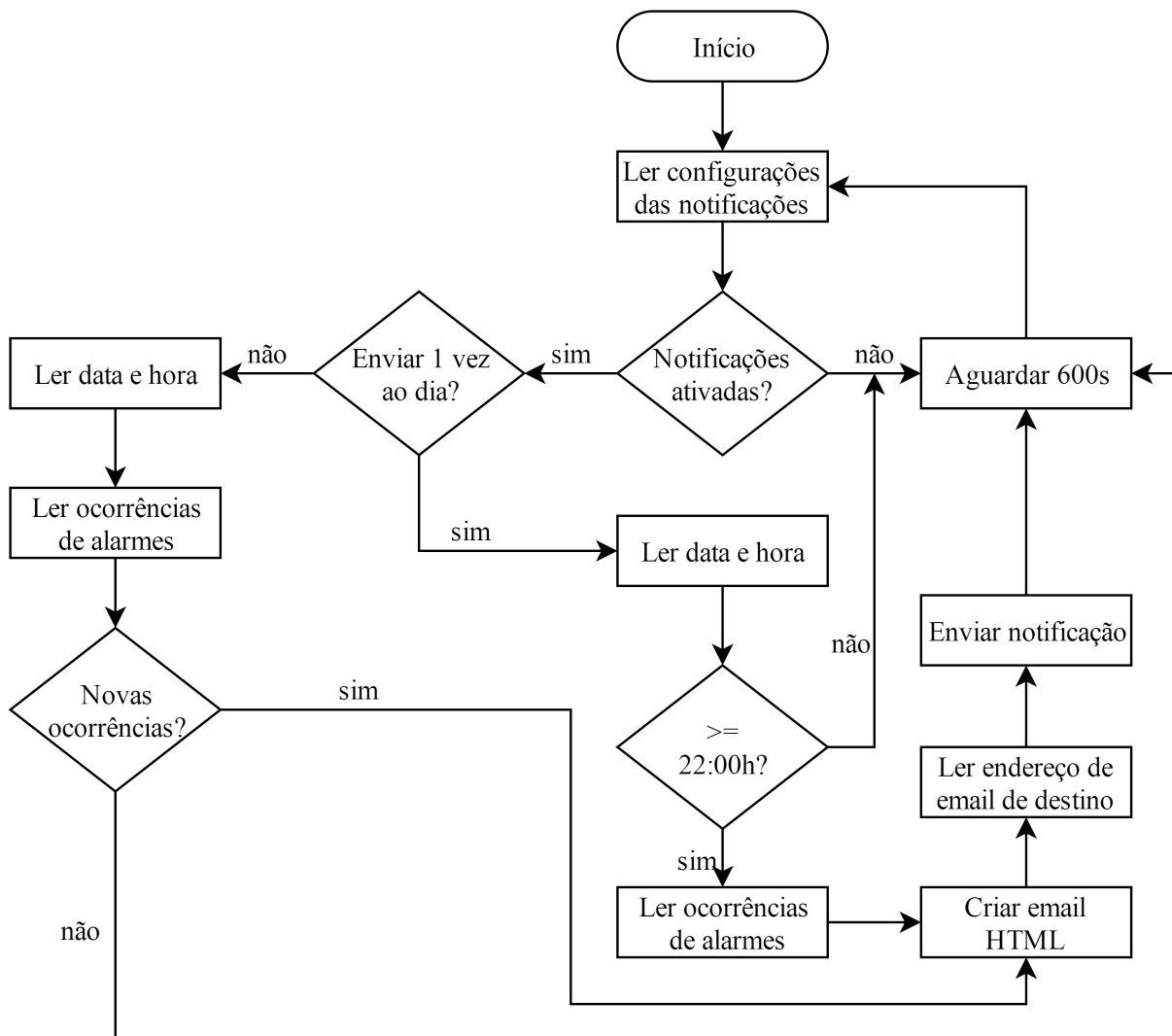


Figura 4-34: Fluxograma do algoritmo de notificação de alarmes.

Na programação do algoritmo foi utilizada a biblioteca *smtplib*, que define um cliente *SMTP* que é usado para o envio de emails.

O programa inicia-se com a leitura, na base de dados, das várias configurações referentes às notificações de email. Estas configurações são introduzidas pelo utilizador através da interface gráfica desenvolvida e incluem a escolha do tipo de alarmes a serem enviados (correspondentes aos alarmes de produção e sistema) e a frequência de envio das notificações (normal ou diária). Caso o envio de notificações por email esteja ativo, e se o utilizador pretender receber as notificações com uma frequência normal (sempre que houver novas ocorrências), é lida a data e hora e consultadas, na base dados, as novas ocorrências de alarmes (ocorridas nos últimos 600s).

De seguida, e caso se verifique a existência de novas ocorrências, é criado um email em linguagem HTML com a respetiva descrição do alarme e data e hora de ocorrência. Finda a

criação do seu conteúdo, é lido, na base de dados, o email de destino da notificação, sendo depois enviada a respetiva notificação. O processo repete-se após 600s.

Foi prevista uma funcionalidade que permite ao utilizador receber no final do dia corrente (depois das 22:00 horas) apenas um email com a lista de todas as ocorrências desse mesmo dia, tal como ilustrado na Figura 4-34. Neste caso, se o utilizador optar por receber as notificações com uma frequência diária, é lida a data e hora e verificada se a hora é igual ou superior às 22:00 horas. Caso esta condição seja verdadeira são consultadas, na base dados, todas as ocorrências de alarmes do dia correspondente. De seguida é o criado email, sendo depois enviada a respetiva notificação.

4.3.4 Integração com o OMS da Martifer Solar

A integração com o OMS da Martifer Solar é feita enviando um ficheiro csv a cada intervalo de 10 minutos. Este ficheiro contém os vários parâmetros monitorizadas. Para o efeito, foi desenvolvido um algoritmo cujo fluxograma é ilustrado na Figura 4-35.

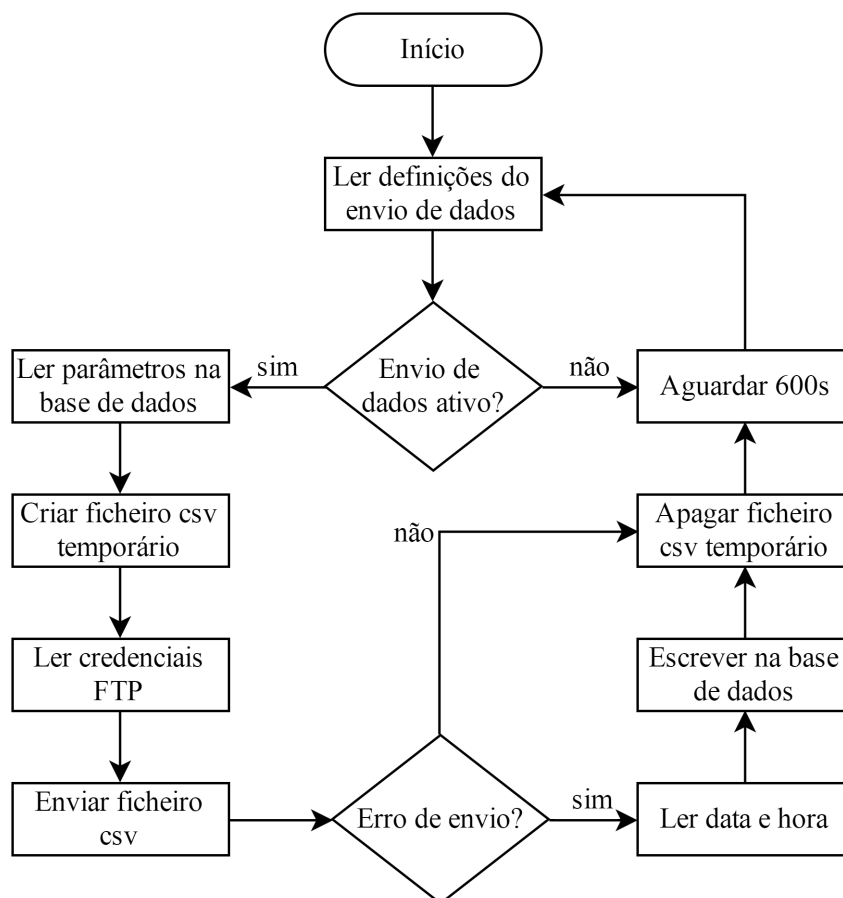


Figura 4-35: Fluxograma do algoritmo do envio de ficheiros para o servidor FTP.

Na implementação deste algoritmo foi utilizada a biblioteca `ftplib`, utilizada para a ligação ao servidor FTP da Martifer Solar e envio do ficheiro `csv`.

O programa é iniciado com uma consulta à base de dados, que tem como objetivo verificar se o utilizador pretende o envio de dados para um servidor FTP. No caso de o envio de dados para o servidor FTP estar ativo, é efetuada outra consulta à base de dados para retornar os parâmetros (elétricos e meteorológicos) monitorizados e guardá-los num ficheiro `csv` temporário.

De seguida, são lidas na base de dados as credenciais de acesso ao servidor FTP, que incluem o endereço do servidor FTP, o utilizador, a palavra passe e pasta para o qual se vai enviar o ficheiro. O ficheiro `csv` é enviado e, após o seu envio, é eliminado o ficheiro temporário, terminando assim o processo, que se inicia novamente ao fim de 600 segundos.

O ficheiro enviado terá um nome do tipo “OUME-aaaammdd.csv”, onde `aaaa` corresponde ao ano, `mm` corresponde ao mês e `dd` corresponde ao dia. No dia seguinte será criado um novo ficheiro e atualizado o seu nome.

4.3.5 Algoritmo Principal

Foi desenvolvido um algoritmo, inicializado no arranque do Raspberry Pi, que tem como objetivo executar todos os programas, apresentados anteriormente.

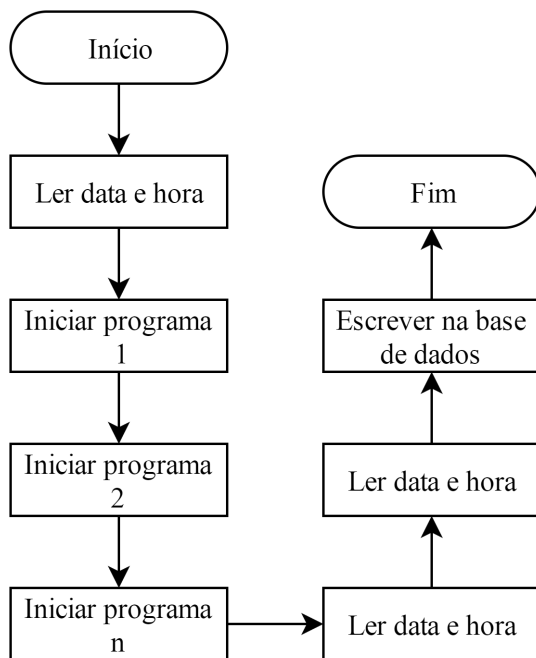


Figura 4-36: Fluxograma do algoritmo principal.

O programa inicia-se com a leitura da data e hora. De seguida, são inicializados, um por um, todos os programas desenvolvidos. Por último, esta informação é devidamente registada na

base de dados com a sua respetiva data e hora de início e de fim.

4.3.6 Interface de Utilizador

A interface gráfica foi desenvolvida em HTML5, JavaScript e PHP, e possibilita a visualização de informação em três línguas diferentes: Português, Inglês e Japonês. Esta interface permite a consulta da informação relativa aos dados recolhidos da instalação FV, armazenados na base de dados. Para que haja interação entre a interface Web e a base de dados foi configurado um servidor Web no Raspberry Pi. Na Figura 4-37 é apresentado o organograma que mostra todos os ecrãs da interface Web.

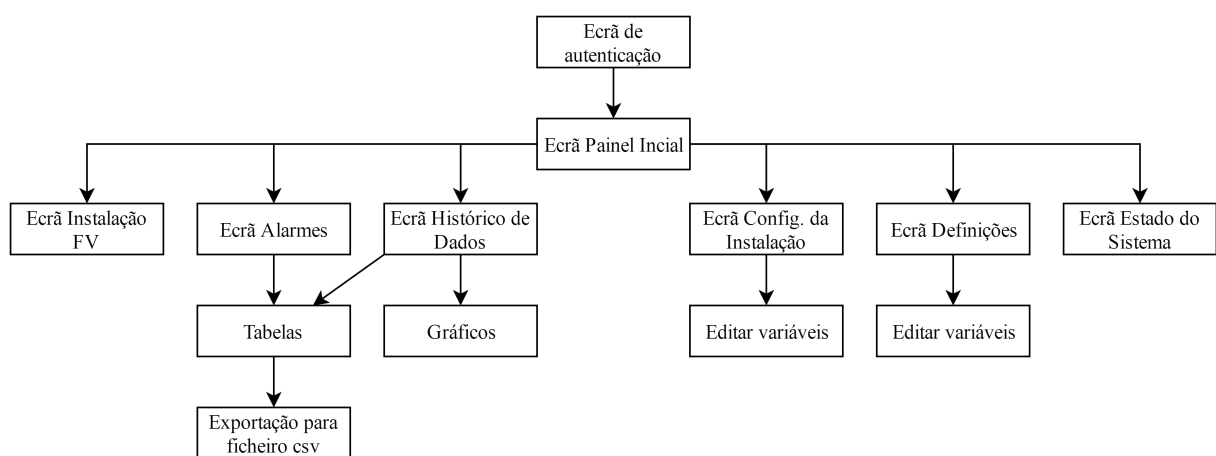


Figura 4-37: Organograma com os diferentes ecrãs da interface Web.

Importa referir que a interface Web foi desenvolvida de modo a adaptar-se a diferentes tamanhos de ecrãs (computadores, tablets e smartphones), sendo que o seu desenvolvimento foi otimizado para dispositivos móveis. A decisão de se optar por uma interface que se adapta ao tamanho de ecrã disponível, foi tomada para evitar a necessidade do desenvolvimento de uma segunda interface ou de uma aplicação para dispositivos com ecrãs de reduzidas dimensões.

A disponibilização da informação através da aplicação Web obedece a uma arquitetura, baseada num modelo de três camadas: camada de dados, camada processual e camada de apresentação. Este modelo, ilustrado na Figura 4-38, encontra-se em concordância com a Norma ANSI/IEEE 1471-2000. A comunicação realiza-se apenas entre camadas adjacentes, não existindo a possibilidade de se efetuar alterações por elementos externos à comunicação.

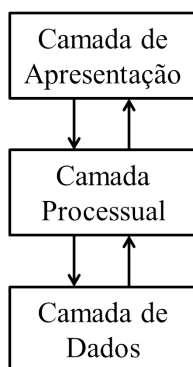


Figura 4-38: Camadas utilizadas para a disponibilização da informação.

A camada de dados é definida como a base de dados. Esta camada recebe os pedidos da camada processual e os seus métodos executam esses pedidos na base de dados.

Na camada processual são geridos os pedidos que são efetuados pela camada de apresentação. Esta camada é responsável por tornar visível, na interface Web, os dados armazenados na base de dados. Outro objetivo desta camada é assegurar a separação entre a camada de dados e a de apresentação aumentando, assim, a segurança uma vez que evita acessos diretos à base de dados.

A camada de apresentação corresponde à interface Web. Esta camada interage diretamente com o utilizador, sendo através dela que são feitos os pedidos que incluem as consultas de informação.

A aplicação Web encontra-se a funcionar de acordo com os pressupostos enunciados na Figura 4-38 e Figura 4-39, com os seguintes elementos:

- Camada de dados: Base de dados no SGBD MySQL;
- Camada processual: Servidor Web Apache;
- Camada de apresentação: Aplicação Web;
- Comunicação entre camada de dados e processual: pedidos feitos em PHP e informação fornecida em JSON;
- Comunicação entre camada de apresentação e processual: pedidos realizados através de requisições AJAX.

Na Figura 4-39 é ilustrado o diagrama da comunicação cliente-servidor.

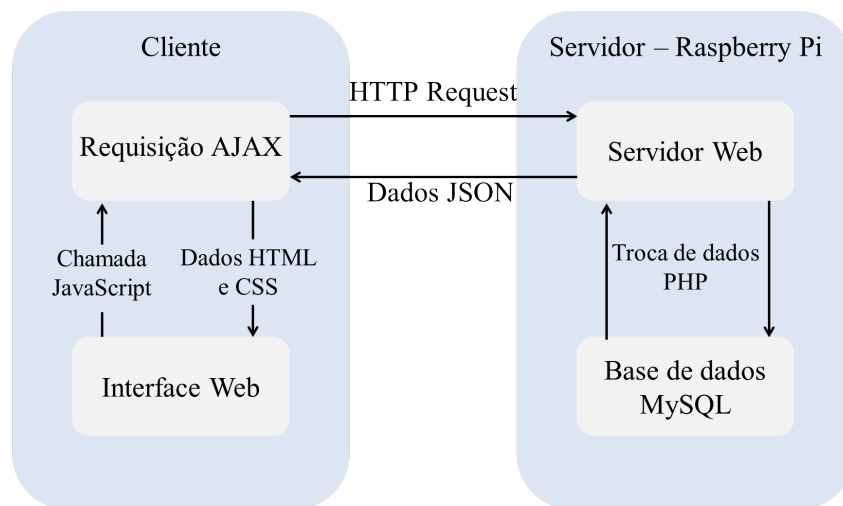


Figura 4-39: Diagrama da comunicação cliente-servidor.

5. Resultados Obtidos e Testes do Sistema

A solução de monitorização desenvolvida, correspondente ao conjunto do hardware e software, foi designada por Oume Solar.

Neste capítulo é apresentado o protótipo desenvolvido. De seguida, é efetuada a comparação de alguns dos dados obtidos pelo Oume Solar com os dados obtidos por um Solar-Log 1000. Por último, é apresentada, em detalhe, a interface gráfica disponibilizada.

5.1 Protótipo Desenvolvido

O protótipo desenvolvido é constituído por: i) um datalogger; ii) um cabo para ligação à tensão AC do inversor; iii) um transformador de corrente; iv) um sensor para deteção de pulsos de luz; v) um sensor de irradiância; vi) um sensor de temperatura dos módulos FV; vii) e um sensor de humidade relativa e temperatura ambiente.

O conjunto composto pelo sensor de irradiância (célula FV) e pelo sensor de temperatura DS18B20 foi designado por sensor FV. O sensor AM2302, utilizado para medir a humidade relativa e a temperatura ambiente, foi designado por sensor Ambiente.

O hardware que constitui o sistema de monitorização é apresentado na Figura 5-1.

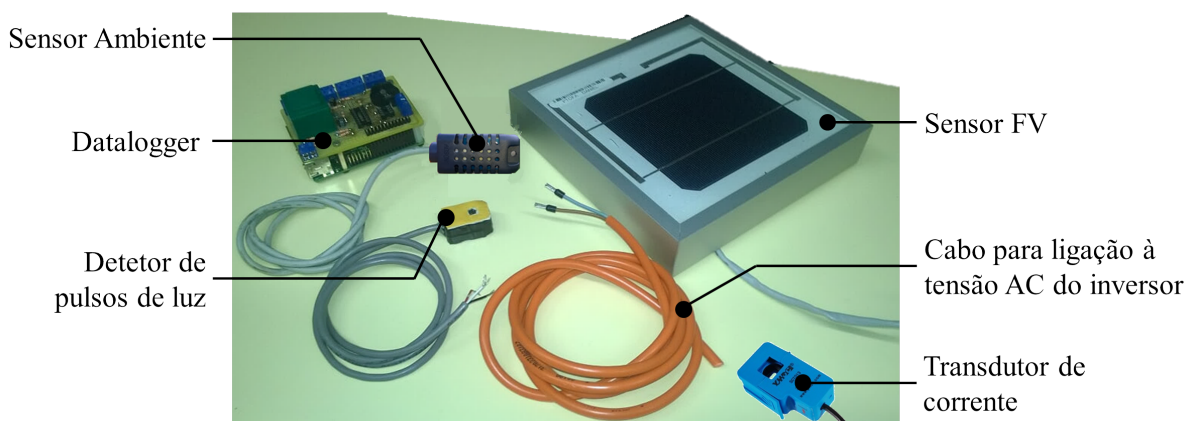


Figura 5-1: Hardware constituinte do protótipo desenvolvido.

Com este hardware garante-se a monitorização de todas as instalações FV dotadas de um inversor monofásico de potência estipulada igual ou inferior a 6 kVA. Tal como referido na secção 4.2.4.2, este sistema pode ser aplicado em instalações com maior potência estipulada, desde que seja utilizado o TC adequado.

No desenvolvimento deste projeto foi fundamental a escolha de soluções, quer ao nível de hardware quer ao nível de software, que possibilitassem que o sistema de monitorização tivesse um custo não superior a 200€. No Quadro 5-1 são apresentados os custos individuais e globais do projeto.

Quadro 5-1: Custos de hardware e de software do Oume Solar.

Material	Quantidade	Custo Aproximado €
Transformador de tensão	1	3,97
Transformador de corrente	1	3,01
Cabos	-	10,35
Sensor AM2302	1	2,42
Célula FV	1	30
Sensor DS18B20	1	2,25
Placa PCB	1	3
ADC MCP3208	1	4,12
RTC DS1307	1	1,45
Componentes eletrónicos	-	0,90
Raspberry Pi B+	1	32,40
Consumíveis e outros	-	5,28
Licenças de software	0	0
Total		99,15

Como é possível verificar pelo quadro anterior, o custo do sistema de monitorização é de aproximadamente 100 €. Este custo é inferior ao teto inicial (de 200 €), pelo que este objetivo foi concretizado. Salienta-se a presença das licenças de software com um custo de 0€, uma

vez que todo o software utilizado foi internamente desenvolvido ou, como é o caso da base de dados MySQL, não tem custos de licenciamento. É importante referir que não estão contabilizados os custos de desenvolvimento.

Foi desenhado um logótipo para o sistema de monitorização, o qual é ilustrado na Figura 5-2.

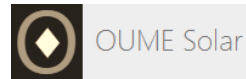


Figura 5-2: Logótipo do Oume Solar.

5.2 Teste no Campus da Martifer Solar

O Oume Solar encontra-se a monitorizar, desde Julho de 2015, uma pequena instalação FV presente no Campus Tecnológico da Martifer Solar. A instalação FV é constituída por um conjunto de 28 painéis FV de 230 W_p, ligados ao inversor Sunny Mini Central 6000A do fabricante SMA. Esta instalação é monitorizada através de um sistema Solar-Log 1000, o qual está equipado com o módulo Solar-Log Sensor Basic o que lhe permite a medição da irradiância solar incidente e da temperatura dos painéis FV. Este sistema de monitorização permite aferir o funcionamento do sistema desenvolvido.

5.2.1 Medição de Parâmetros

5.2.1.1 Parâmetros AC

A validação dos valores da tensão eficaz, da corrente eficaz, da potência ativa, da potência aparente e do fator de potência medidos pelo Oume Solar foi efetuada através da determinação dos erros de medição no valor destas variáveis. Para o efeito, foram realizados alguns ensaios e monitorizado um conjunto de valores obtidos pelo sistema de monitorização desenvolvido e pelos aparelhos de medição FLUKE 1587, Extech EX845 e Fluke 434 Series II. Importa salientar que estes equipamentos de medida estão devidamente calibrados.

No Quadro 5-2 são apresentados alguns valores de tensão obtidos nos ensaios assim como o erro associado a cada uma dessas medições.

Quadro 5-2: Erro da medição no valor eficaz da tensão.

Tensão Eficaz (V)		Erro de Medição (%)
Oume Solar	Fluke 1587	
233,40	235,5	-0,89
235,33	235,9	-0,24
234,71	235,3	-0,25
234,10	234,8	-0,30
235,03	236,3	-0,54
234,61	235,7	-0,46

Como é possível constatar pelo quadro anterior, a medição da tensão pelo Oume Solar apresenta um erro inferior a 0,9%. Este erro é considerado aceitável, dado que o equipamento utilizado para comparação tem uma precisão de 1%.

Os ensaios na medição da corrente foram efetuados à saída do inversor presente na instalação FV utilizada para os testes. O Quadro 5-3 apresenta alguns dos valores obtidos, assim como o erro presente em cada medição.

Quadro 5-3: Erro da medição no valor eficaz da corrente.

Corrente Eficaz (A)		Erro de Medição (%)
Oume Solar	Extech EX845	
0,34	0,3	+13,33
0,53	0,5	+6,00
0,73	0,7	+4,29
1,14	1,1	+3,64
1,65	1,6	+3,12
2,23	2,3	-3,04
3,77	3,9	-3,33
7,59	7,45	+1,20
19,57	19,5	+0,36
22,54	22,6	-0,27
23,07	23,2	-0,56

Como é possível constatar pelos valores presentes no quadro anterior, o erro é mais elevado para correntes de menor valor. O erro para correntes inferiores a 0,3 A não pode ser quantificado de forma confiável e para correntes inferiores a 0,4 é maior que 10%. Para valores de corrente superiores a 1 A, o erro é um pouco superior a 3,5%. Para valores superiores a 5A o erro é inferior a 2%.

O valor do erro, presente na medição da corrente, é influenciado pelo facto do equipamento utilizado para comparação (Extech EX845) ter um resolução de 0,1 A.

O erro existente no valor da medição da potência ativa é mostrado no Quadro 5-4.

Quadro 5-4: Erro na medição do valor da potência ativa.

Potência Ativa (W)		Erro de Medição (%)
Oume Solar	Fluke 434 Series II	
75,22	67	+12,27
110,64	104	+6,38
171,18	764	+4,63
315,18	304	+3,68
733,10	709	+3,40
1050,01	1015	+3,45
1720,11	1670	+3,00
2521,07	2486	+1,41
3372,89	3359	+0,41
4121,77	4150	-0,68

Como é possível verificar pelo quadro anterior, o erro de medição é superior para potências de menor valor. Esta facto é justificável pela existência de correntes reduzidas que, tal como verificado anteriormente, apresentam um erro de medição mais elevado.

No Quadro 5-5 estão presentes alguns valores da potência aparente obtidos nos ensaios assim como o erro associado a cada medição.

Quadro 5-5: Erro na medição do valor da potência aparente.

Potência Aparente (VA)		Erro de Medição (%)
Oume Solar	Fluke 434 Series II	
74,94	67	+11,85
135,41	130	+4,16
339,77	330	+2,96
724,07	747	+2,29
1440,98	1424	+1,19
2707,21	2660	+1,77
3460,78	3465	-0,12
4400,58	4449	-1,09
4435,66	4439	-0,08

Tal como na potência ativa, o erro é maior para correntes de menor valor, uma vez que o valor da potência aparente depende diretamente dos erros de medição do valor eficaz da tensão e do valor eficaz da corrente.

Os valores do fator de potência obtidos nos ensaios, assim como o erro existente em cada medição, são mostrados no Quadro 5-6.

Quadro 5-6: Erro na medição do valor do fator de potência.

Fator de Potência		Erro de Medição (%)
Oume Solar	Fluke 434 Series II	
0,98	0,956	-2,51
1,00	0,988	-1,21
0,99	1,001	+1,10
0,97	0,994	+2,41
1,01	0,999	-1,10

Como é possível verificar pelo quadro anterior, o erro de medição do valor do fator de potência é de cerca 2,5%. Uma vez que o fator de potência é dado pela relação entre a potência ativa e a potência aparente, o erro de medição depende diretamente do erro presente em ambas as potências. O valor do erro é também influenciado pela resolução, de duas casas decimais, dos valores obtidos pelo Oume Solar.

É importante referir que é pretendido um sistema de monitorização de baixo custo. Como tal, os erros encontrados na medição dos vários parâmetros AC estão dentro do expectável, considerando-se como aceitáveis. O valor do erro na medição de correntes reduzidas é mais elevado, o que afeta a potência ativa. Contudo, este erro tem pouco relevância quando são comparados os valores da energia diária produzida pela instalação FV, tal como é apresentado na secção 5.2.2.

A energia produzida pela instalação é calcula a partir do integral da potência ativa (medida no inversor). Contudo, no caso de ser utilizado o sensor para deteção de pulsos de luz, a energia é também calculada a partir da contagem destes pulsos. Devido à localização do contador de energia na instalação FV utilizada para os testes, não foi possível utilizar o sistema de deteção de pulsos. Contudo, para aferir a qualidade dos valores obtidos, foi possível realizar um ensaio em ambiente real. Este ensaio foi efetuado no dia 11-08-2015 durante 3 horas, numa instalação FV com uma potência instalada de 246 kW, presente no Campus Tecnológico da Martifer Solar.

Na instalação utilizada para testar o detetor de pulsos de luz, a energia produzida é medida através de um contador Itron SL7000. O LED da energia ativa presente neste contador tem um fator de 1 pulso/kWh. Na Figura 5-3 é mostrado o detetor de pulsos de luz aplicado no contador de energia.



Figura 5-3: Detetor de pulsos de luz aplicado no contador de energia.

Após o teste, foi possível verificar que durante as 3 horas foram contados 161 pulsos. Analisando o histórico do contador de energia constatou-se que foram medidos 161 kWh durante este período de tempo. O ensaio foi realizado num local abrigado da luz ambiente.

5.2.1.2 Irradiância Incidente

A validação dos valores da irradiância solar foi efetuada através da determinação do erro existente na sua medição. Para o efeito, foram realizados alguns ensaios e comparados alguns valores de irradiância obtidos pelo Oume Solar e pelo medidor de curvas IV I-V400 da HT Instruments (que se encontra devidamente calibrado). No Quadro 5-7 são apresentados alguns valores obtidos nos ensaios assim como o erro presente em cada medição.

Quadro 5-7: Erro na medição do valor da irradiância solar.

Irradiância Incidente (W/m^2)		Erro de Medição (%)
Oume Solar	I-V400	
41,53	50	-16,94
62,15	69	-9,93
111,34	119	-6,44
245,88	230	+6,90
368,50	351	+4,99
394,51	380	+3,82
479,42	470	+2,00
586	590	-0,68
680,43	695	-2,10
707,62	717	-1,31
881,4	899	-1,96
965,12	999	-3,39

O erro de medição da irradiância solar é superior a 20% para valores inferiores a 40 W/m². Para valores de irradiância superiores a 100 W/m² o erro tem um valor máximo de 7% . O erro é afetado pela resolução de 8 W/m² com que é medida a irradiância solar (a partir do sistema de monitorização desenvolvido).

O sensor de irradiância desenvolvido apresenta-se com um custo residual, (quando comparado com o custo de um sensor comercial), pelo que valor do erro é considerado aceitável. Apesar do erro de medição ser elevado para irradiâncias baixas, este valor tem pouca relevância quando são comparados valores de irradiação, tal como demonstrado na secção 5.2.2.

5.2.2 Comparação com o Solar-Log 1000

Tal como mencionado anteriormente, a instalação FV utilizada para testes é atualmente monitorizada pelo sistema desenvolvido (Oume Solar) e por um sistema de monitorização comercial (Solar-Log 1000). Isto permitiu fazer uma comparação dos resultados fornecidos por estes dois sistemas, particularmente no que se refere à potência ativa, energia ativa, irradiância incidente e irradiação incidente.

A Figura 5-4 apresenta a comparação da potência ativa para o dia 03-03-2016.

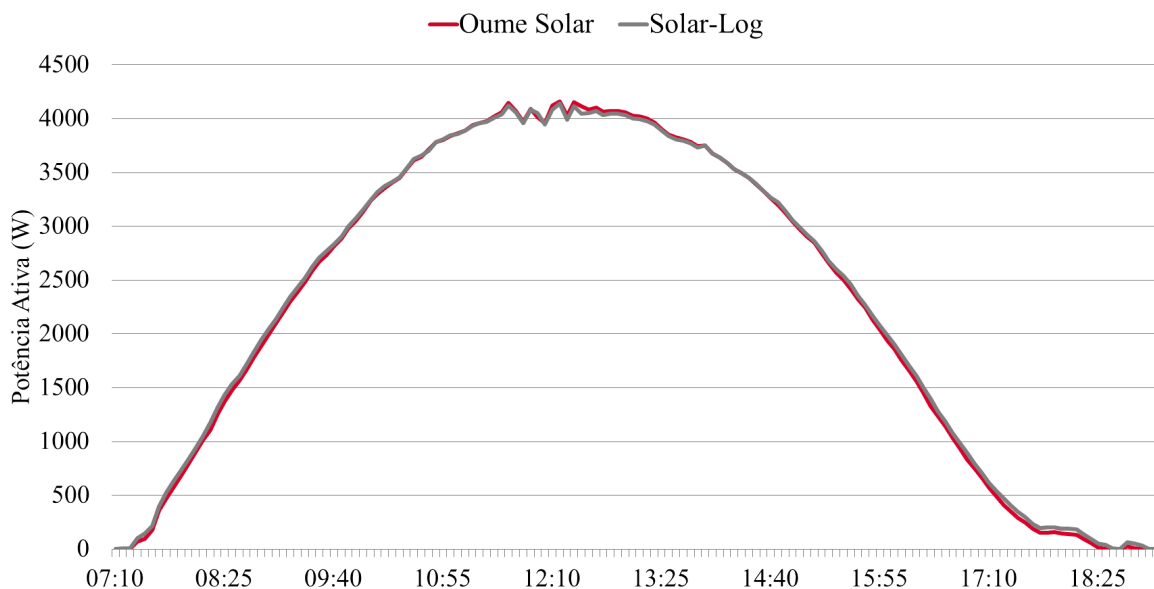


Figura 5-4: Comparação entre os valores da potência ativa, para o dia 03-03-2016.

De acordo com a figura anterior, é possível constatar que os valores obtidos pelo Oume Solar são idênticos aos obtidos pelo Solar-Log 1000. Foram efetuadas outras comparações para diferentes dias, contudo a tendência de resultados manteve-se.

Na Figura 5-5 é mostrada a comparação da energia diária produzida pela instalação FV para o

mês de Março de 2016.

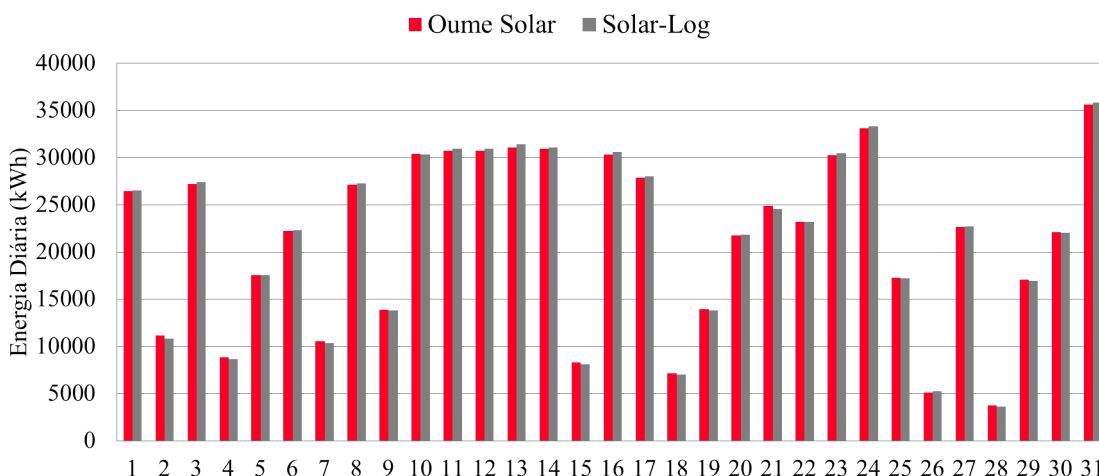


Figura 5-5: Comparação entre os valores da energia ativa diária, para o mês de Março de 2016.

O valor da energia diária, para o mês de Março, apresentou um erro máximo inferior a 3,3%, que se verifica para os dias de menor produção.

A comparação entre os valores da irradiância solar, ao longo do dia 03-03-2016, é mostrada na Figura 5-6.

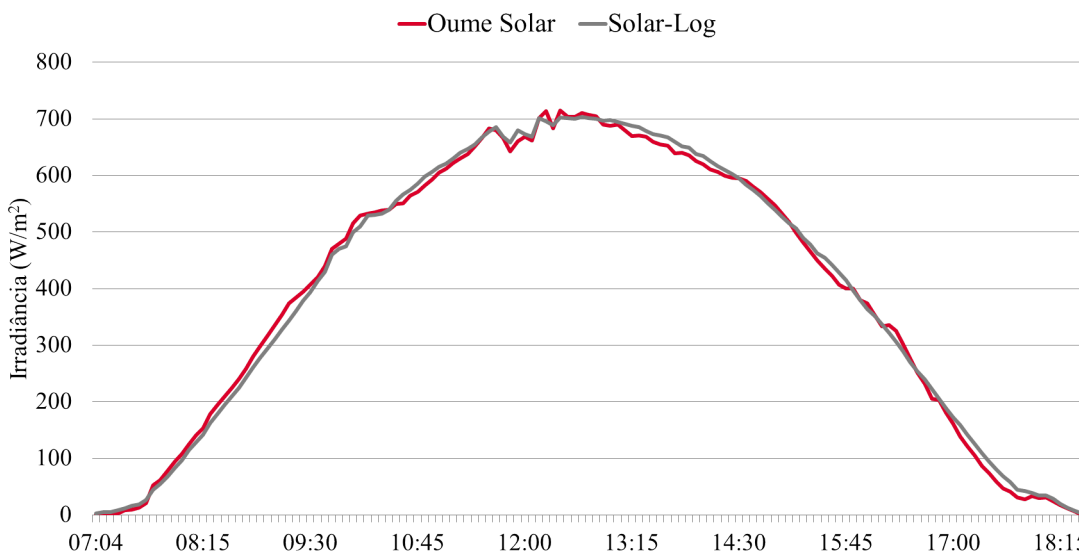


Figura 5-6: Comparação entre os valores da irradiância solar, para o dia 03-03-2016.

A irradiância apresenta uma maior variação entre o que é medido pelo Oume Solar e pelo Solar-log. Esta variação é expectável, tendo em conta o erro existente na medição da irradiância (ver Quadro 5-7). Os resultados obtidos são contudo, aceitáveis. Tal como na comparação da potência, foram feitas análises à irradiância para diferentes dias, no entanto,

apesar de algumas variações, os resultados foram semelhantes.

Na Figura 5-7 é mostrada a comparação da irradiação diária incidente nos módulos FV referente ao mês de Março de 2016.

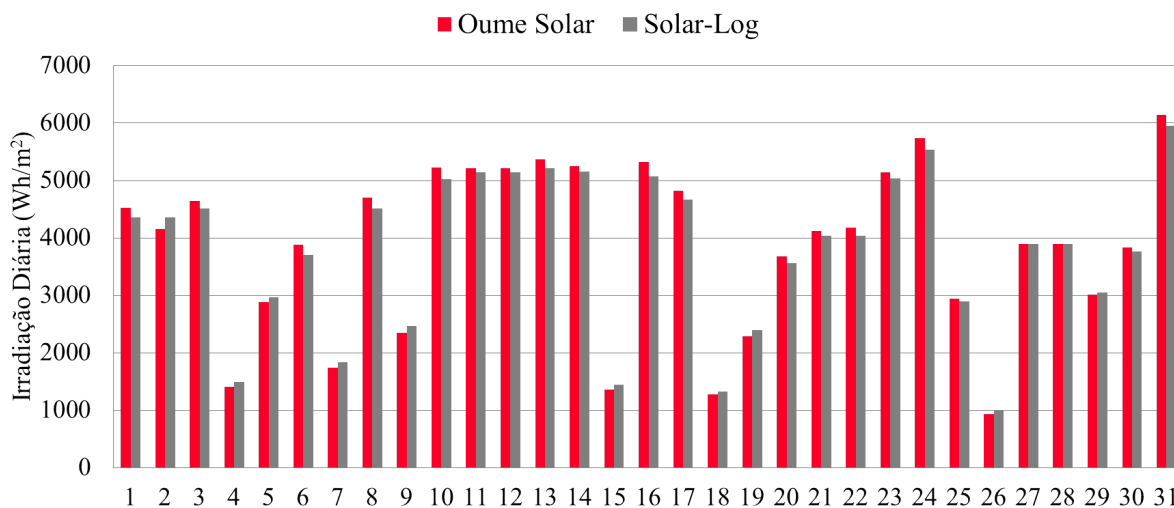


Figura 5-7: Comparação entre os valores da irradiação diária, para o mês de Março de 2016.

O valor da irradiação solar diária tem um erro máximo 6,3%, que se verifica para os dias com menor irradiação.

5.3 Interface Web

O Oume Solar possui uma interface Web intuitiva para consulta da informação referente à instalação FV monitorizada. O acesso a esta interface pode ser efetuado através de qualquer equipamento com um navegador Web. Para isso, é necessário introduzir o IP do sistema de monitorização ou o nome de rede “oume” na barra de endereço do navegador, como se ilustra na Figura 5-8.

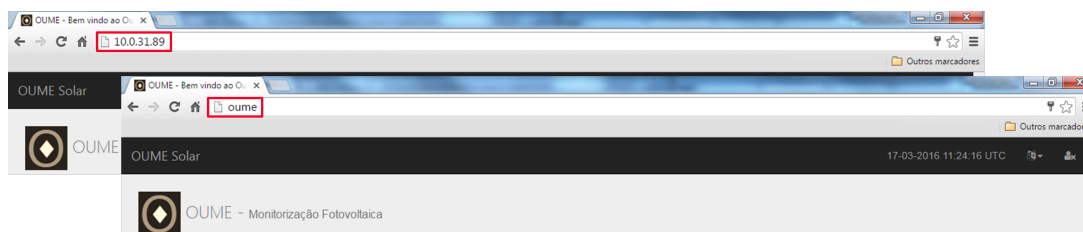


Figura 5-8: Acesso à interface gráfica do sistema de monitorização.

A interface gráfica desenvolvida ajusta-se automaticamente a diferentes tamanhos de ecrãs

(computador, tablet e smartphone). Na Figura 5-9 é possível ver o conteúdo de uma página do sistema de monitorização disponível a partir de um computador e de um smartphone.

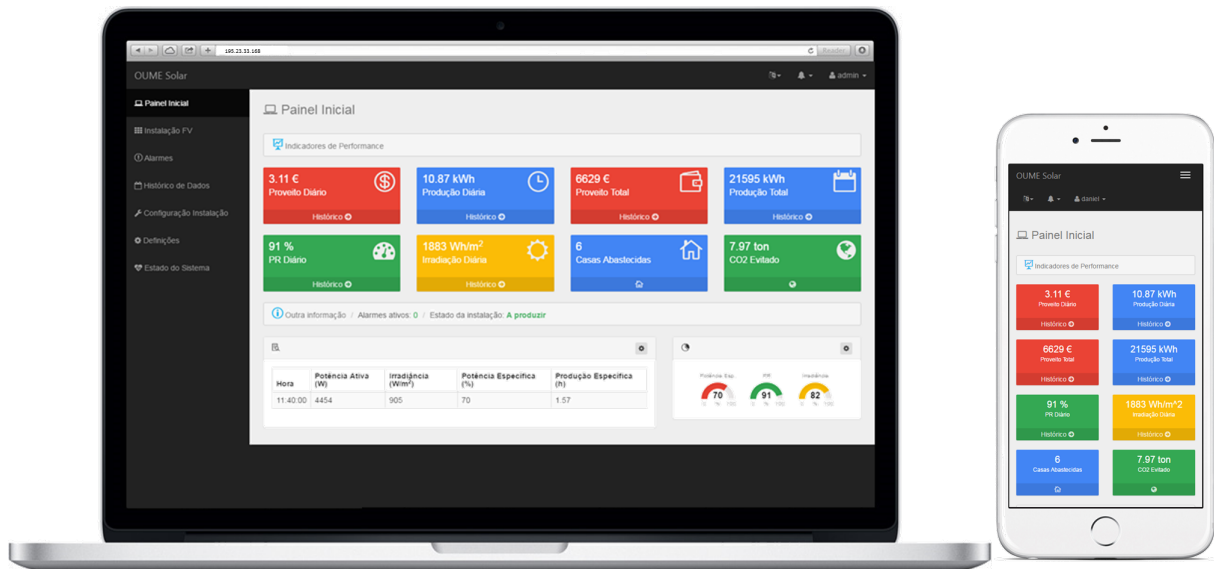


Figura 5-9: Interface Web ajustada de acordo com o tamanho de ecrã do dispositivo.

Na Figura 5-10 são apresentados diferentes ecrãs da interface desenvolvida, disponibilizados a partir de um smartphone.

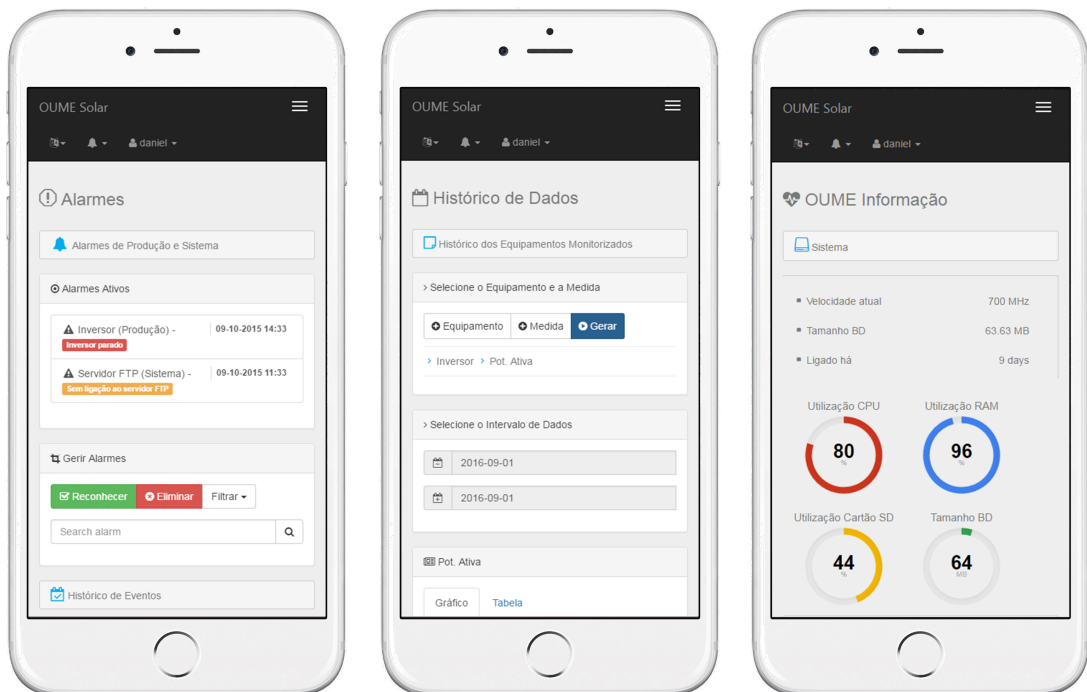


Figura 5-10: Visualização de vários ecrãs do Oume Solar num smartphone.

A interface gráfica foi desenvolvida por forma a disponibilizar toda a informação em Português, Inglês e Japonês, tal como se ilustra na Figura 5-11.

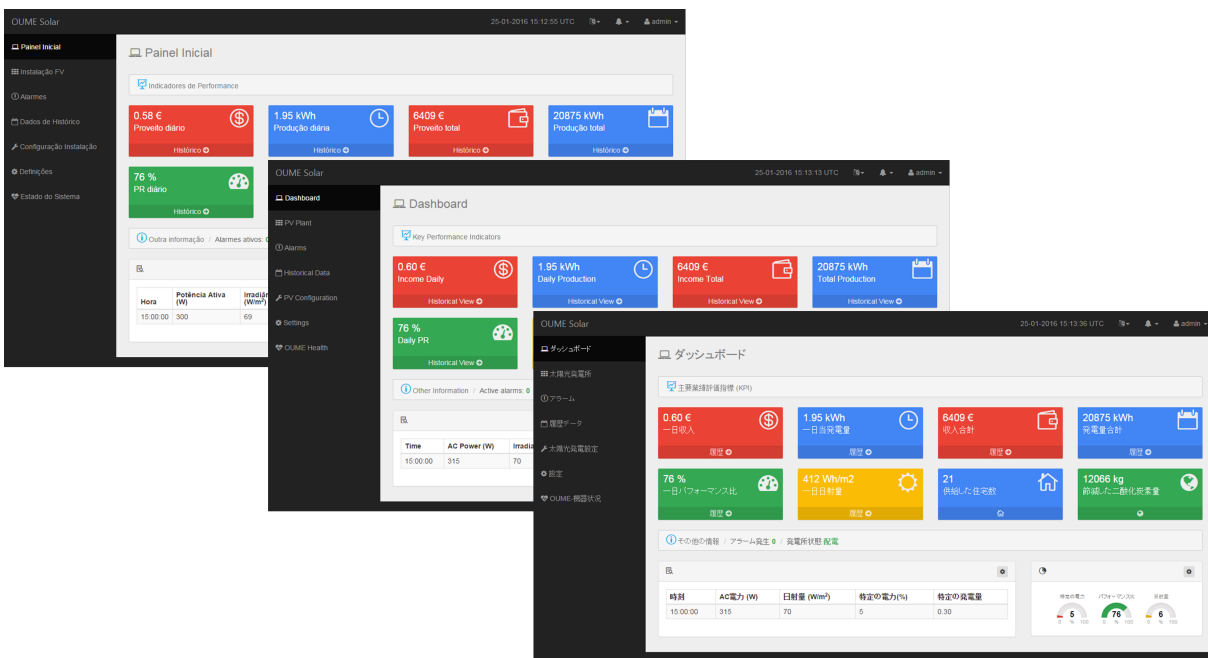


Figura 5-11: Exemplo de um ecrã do Oume Solar apresentado em Português, Inglês e Japonês.

5.3.1 Sistema de Autenticação

O acesso à interface Web do sistema de monitorização é efetuado através do ecrã de autenticação, o qual se ilustra na Figura 5-12. É necessária a autenticação com um nome de utilizador e palavra passe. A gestão destes utilizadores é possível através desta mesma interface, no ecrã “Definições”.

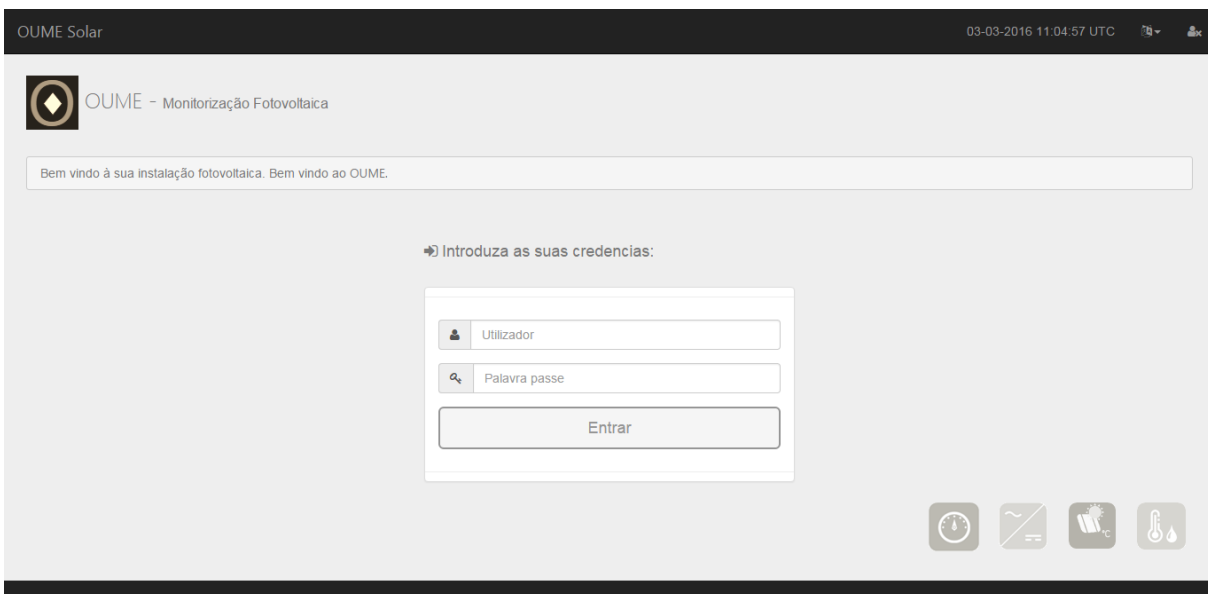


Figura 5-12: Ecrã de autenticação.

No ecrã de autenticação está disponível o formulário de autenticação e também uma barra

horizontal no topo, com diferentes opções. Nesta barra, onde é mostrada a hora e data do sistema de monitorização, é possível alterar a língua de apresentação (ver Figura 5-13).

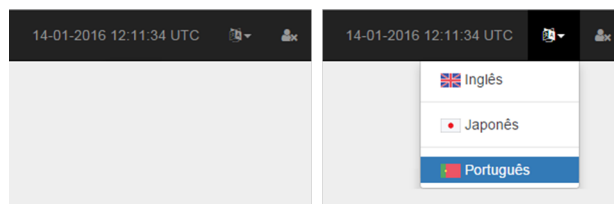


Figura 5-13: Opções disponíveis na barra horizontal.

Na barra horizontal, o ícone mais à direita indica que não existe nenhum utilizador autenticado. Estão disponíveis diferentes níveis de acesso à plataforma. Dependendo do nível de utilizador, são disponibilizados um conjunto de menus na barra de navegação lateral que serão apresentados de seguida. No Quadro 5-8 são apresentados os ecrãs disponíveis de acordo com o nível de utilizador.

Um utilizador de nível “Administrador” tem acesso a todos os menus e funções da interface Web. Este utilizador está habilitado a alterar definições, reinicializar o sistema de monitorização, entre outras funções. Apenas este utilizador tem permissões para apagar ou criar novos acessos.

Quadro 5-8: Menus disponíveis para cada nível de acesso.

Ecrãs	Nível de acesso		
	Administrador	Utilizador	Convidado
Painel Inicial	✓	✓	✓
Instalação FV	✓	✓	✓
Alarmes	✓	✓	
Histórico de Dados	✓	✓	
Configuração da Instalação	✓		
Definições	✓		
Estado do Sistema	✓	✓	

Para o acesso à interface gráfica, estão disponíveis dois utilizadores definidos por omissão:

- Utilizador “sistema”: este utilizador não pode ser removido. Trata-se de um utilizador de segurança com acesso total ao sistema;
- Utilizador “oume”: este utilizador tem permissões de administrador e pode ser gerido normalmente no ecrã das definições.

No caso de alguma tentativa de autenticação com um utilizador ou palavra passe incorretos, é apresentada uma mensagem de erro, como ilustrado na Figura 5-14.



Figura 5-14: Mensagem de erro de autenticação.

5.3.2 Ecrã “Painel Inicial”

Após a autenticação, o utilizador é redirecionado para o ecrã “Painel Inicial” do sistema de monitorização, o qual se ilustra na Figura 5-15.

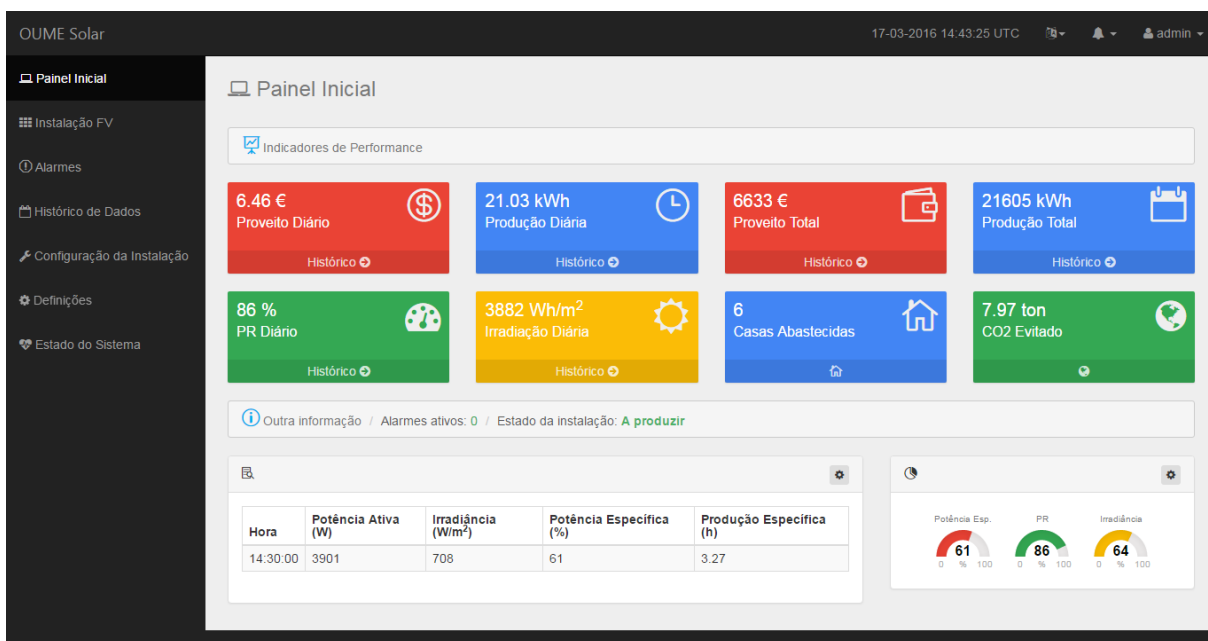


Figura 5-15: Ecrã “Painel Inicial”.

Como é possível verificar pela imagem anterior, o “Painel Inicial” contém a barra horizontal (embora com mais opções) e uma barra de menus vertical.

A barra de menus vertical, colocada no lado esquerdo, permite a navegação entre os ecrãs disponíveis no sistema de monitorização, os quais contêm informação relevante acerca da instalação FV.

Na barra horizontal está presente a data e hora do sistema de monitorização, um botão para

alterar a língua de apresentação, um indicador de alarmes e outro botão que permite ao utilizador aceder ao ecrã das definições ou sair da aplicação. O indicador de alarmes permite uma visualização rápida dos alarmes atualmente ativos. No caso da Figura 5-16 é ilustrada uma situação em que não existem alarmes (imagem da esquerda) e outra situação em que existem dois alarmes ativos (imagem da direita).

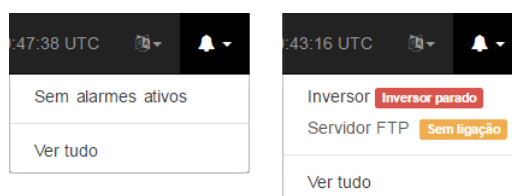


Figura 5-16: Botão para a visualização rápida dos alarmes ativos.

No ecrã “Painel Inicial” é mostrada uma perspetiva geral da instalação. Este ecrã está dividido em duas áreas por forma a manter a informação organizada e fácil de consultar. Na área “Indicadores de Desempenho” estão disponíveis oito retângulos coloridos com um conjunto de informação referente à instalação. Está disponível a quantidade de energia produzida (diária e total), os proveitos diários e totais, o índice de desempenho diário, a irradiação diária, assim como o número de casas abastecidas e a quantidade de CO₂ evitado.

Em seis destes retângulos está disponível a opção “Histórico” que permite uma consulta rápida dos valores de histórico. O utilizador ao clicar num destes botões é redirecionado para uma página com informação referente ao retângulo correspondente. A Figura 5-17 ilustra o ecrã para o caso em que o utilizador clica no botão “Histórico” do retângulo “Proveito Diário”.

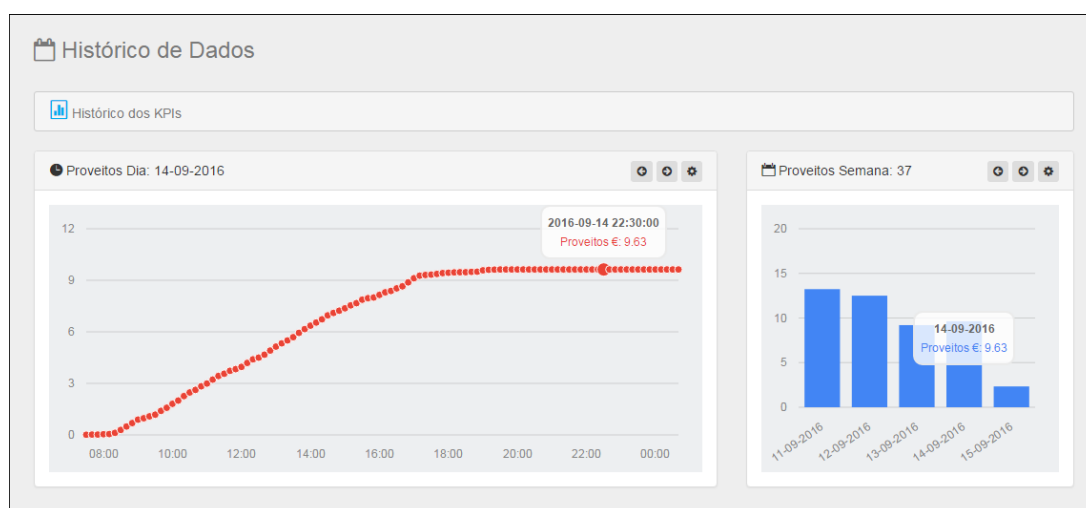


Figura 5-17: Histórico de dados referente aos proveitos diários.

Neste ecrã estão disponíveis dois gráficos. No gráfico da esquerda está presente a faturação ao longo do dia corrente. O gráfico da direita mostra a faturação da semana corrente, utilizando

uma barra por cada dia da semana (a começar no Domingo). Ambos os gráficos são atualizados em períodos de 10 minutos. No canto superior direito de cada gráfico estão disponíveis 3 botões. As duas setas permitem, no caso do gráfico da esquerda, recuar ou avançar um dia. No gráfico da direita, as setas permitem avançar ou recuar uma semana. O botão com o ícone de uma engrenagem abre um menu do tipo lista (Figura 5-18) com a opção para guardar a imagem do respetivo gráfico ou proceder à sua impressão.

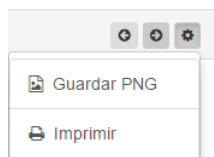


Figura 5-18: Botões para guardar uma imagem do gráfico ou para o imprimir.

Na Figuras 5-19, 5-20, 5-21 e 5-22 são apresentados outros ecrãs de histórico, nomeadamente referentes à produção diária, índice de desempenho, irradiação incidente e produção total.

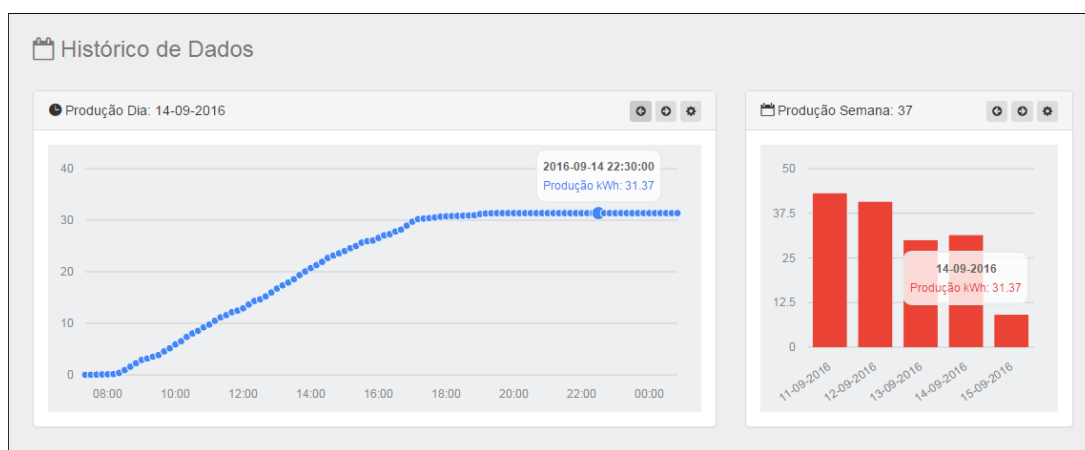


Figura 5-19: Histórico de dados referente à produção diária.

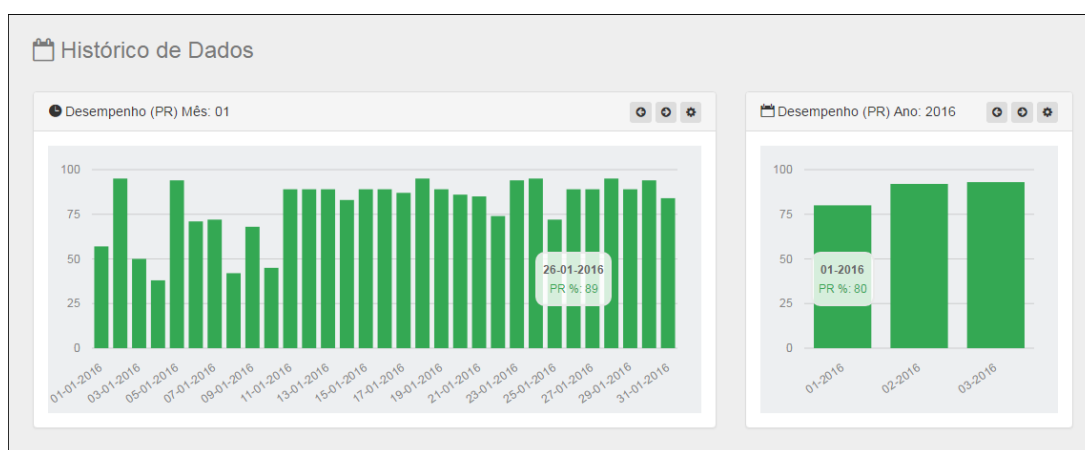


Figura 5-20: Histórico de dados referente ao índice de desempenho.

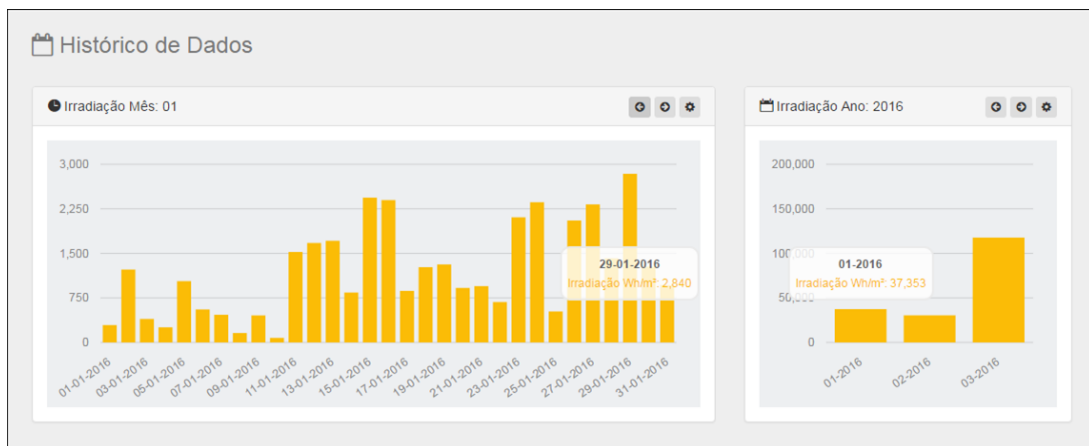


Figura 5-21: Histórico de dados referente à irradiação incidente.

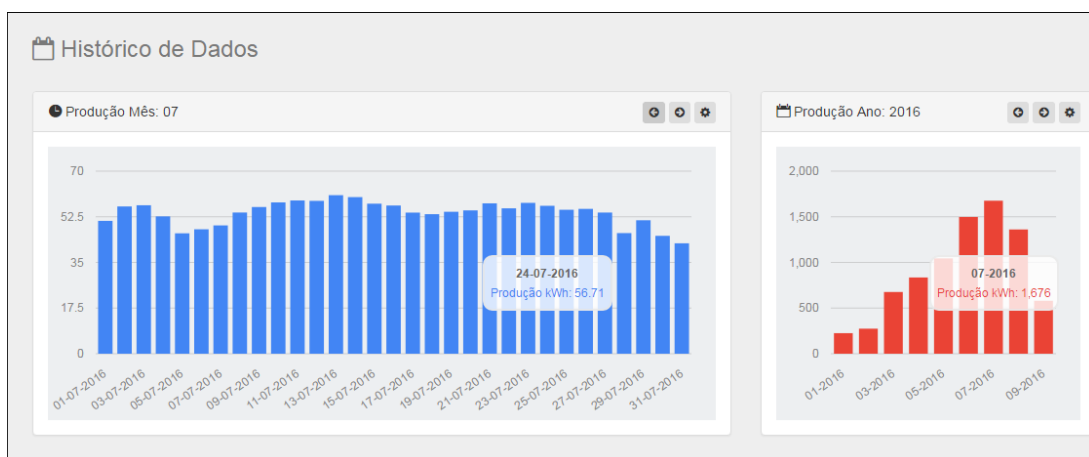


Figura 5-22: Histórico de dados referente à produção total.

A barra “Outra informação”, presente no ecrã “Painel Inicial”, mostra o número de alarmes ativos e se a instalação está, ou não, a produzir energia. Na Figura 5-15 é apresentada uma situação em que se verificam zero alarmes e a instalação se encontra a produzir. O termo “A produzir” é intermitente e muda de acordo com o estado da instalação, isto é, enquanto a instalação FV não estiver a produzir energia, é mostrado o termo “Sem produção”. Na Figura 5-23 é ilustrada uma situação em que a instalação se encontra sem produção e com alarmes ativos.

Alarmes ativos: 2 / Estado da instalação: **Sem produção**

Figura 5-23: Barra “Outra informação”.

O ecrã “Painel Inicial” possui ainda uma tabela com outros parâmetros importantes referentes ao estado atual da instalação FV. Nesta tabela, no canto superior direito, existe um botão que permite exportar os dados para um ficheiro csv ou imprimir a tabela, tal como ilustrado na Figura 5-24.



Hora	Potência Ativa (W)	Irradiância (W/m ²)	Potência Específica (%)
14:30:00	3901	708	61

Figura 5-24: Botão para imprimir a tabela ou exportar os dados para um ficheiro csv.

Do lado direito da tabela anterior está presente um conjunto de três gráficos que permitem ver graficamente o valor da potência específica, o índice de desempenho e a irradiância normalizada. Aqui, encontra-se também disponível um botão que permite guardar uma imagem dos três gráficos ou imprimi-los, tal como se ilustra na Figura 5-25.

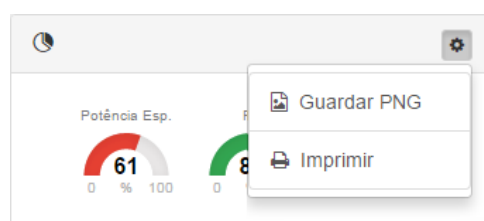


Figura 5-25: Botão para guardar como imagem ou imprimir os gráficos.

A barra de menus lateral e a barra horizontal estão presentes em todos os ecrãs da interface Web. Por forma a melhorar a legibilidade, estes menus são omitidos nas figuras que se seguem.

5.3.3 Ecrã “Instalação FV”

O ecrã “Instalação FV”, ilustrado na Figura 5-26, contém informação detalhada referente a cada equipamento monitorizado. Este ecrã está organizado de forma semelhante ao anterior. A área dos equipamentos monitorizados contém quatro retângulos:

- Inversor: neste retângulo estão presentes os parâmetros monitorizados no lado AC do inversor. No canto superior direito deste retângulo existe um botão auxiliar que permite ao utilizador consultar outros parâmetros relativos a este equipamento (ver Figura 5-27).;
- Contador de energia: neste retângulo está presente a energia monitorizada através da contagem dos pulsos de luz no contador de energia. Uma vez que a monitorização do contador é opcional, e no caso de esta não existir, os valores aqui presentes correspondem à energia obtida a partir do integral da potência ativa do inversor;
- Sensor FV: neste retângulo estão disponíveis os valores da irradiância incidente, da irradiação diária e também da temperatura dos módulos FV;
- Sensor Ambiente: neste retângulo estão presentes os valores da temperatura ambiente e da humidade relativa.

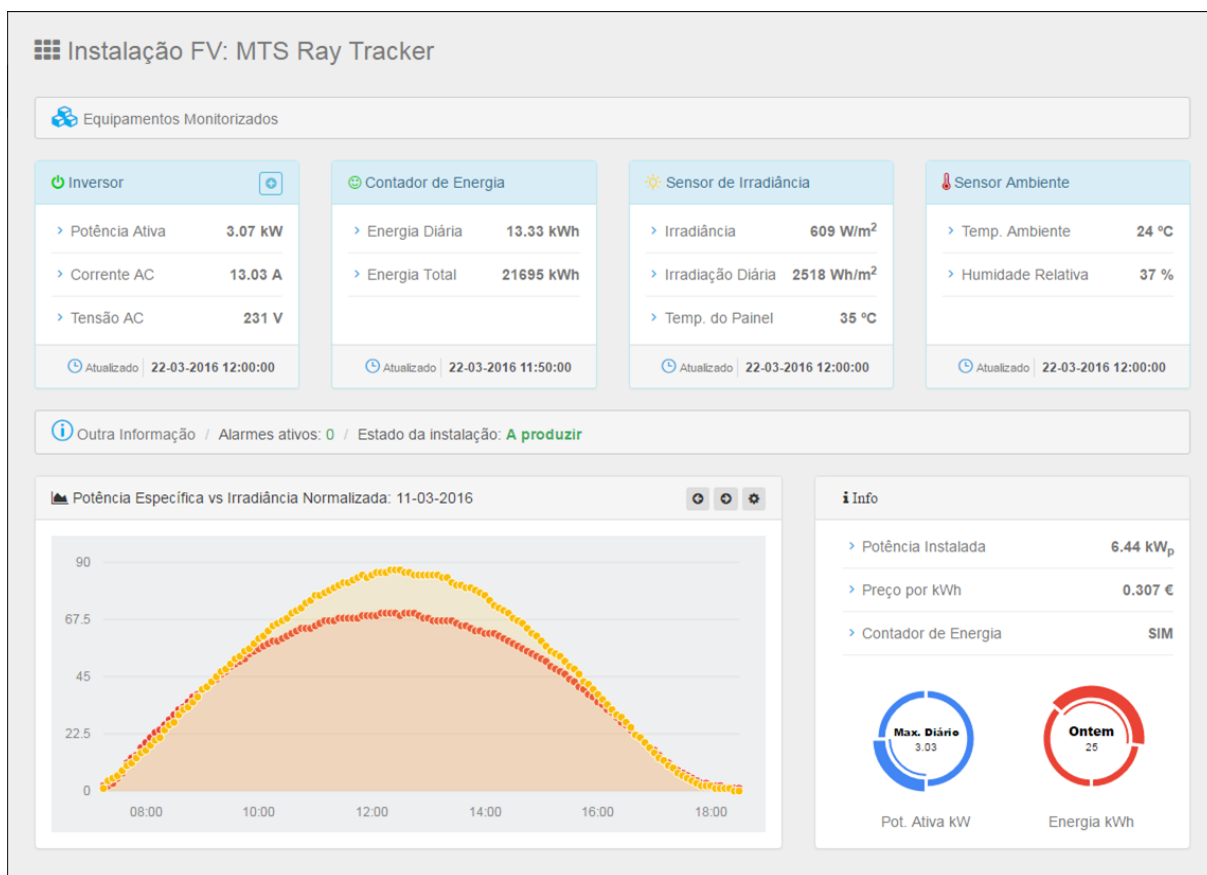


Figura 5-26: Ecrã “Instalação FV”.

Em todos estes retângulos está disponível a data e hora de aquisição dos valores apresentados.

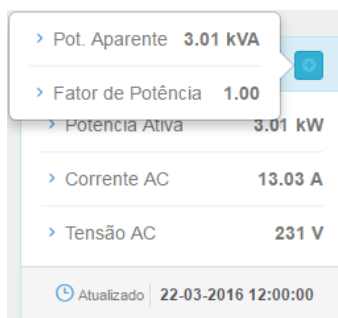


Figura 5-27: Informação adicional referente ao inversor.

No canto superior esquerdo de cada retângulo existe um ícone animado que altera a cor ou a forma de acordo com determinados valores de algumas variáveis. No retângulo do inversor, o ícone é verde quando o inversor está a injetar potência e vermelho quando este não está a injetar. No retângulo do contador de energia, está presente um ícone verde quando a instalação produz energia ou vermelho quando não há produção de energia. No retângulo do sensor FV, é mostrado um sol quando a irradiância for superior a 50 W/m² ou uma lua quando for inferior a este valor. No retângulo do sensor ambiente, o ícone da temperatura é vermelho quando a

temperatura for igual ou superior 21°C. Caso contrario, o ícone será azul. Na Figura 5-28 é ilustrado um exemplo da situação descrita.

Inversor	Contador de Energia	Sensor FV	Sensor Ambiente
> Potência Ativa 0.00 kW	> Energia Diária 23.59 kWh	> Irradiância 0 W/m²	> Temp. Ambiente 8 °C
> Corrente AC 0.00 A	> Energia Total 21705 kWh	> Irradiação Diária 4205 Wh/m²	> Humidade Relativa 83 %
> Tensão AC 223 V		> Temp. do Pannel 4 °C	
Atualizado 22-03-2016 22:40:00	Atualizado 22-03-2016 22:40:00	Atualizado 22-03-2016 22:40:00	Atualizado 22-03-2016 22:40:00

Figura 5-28: Valores das variáveis dos diversos equipamentos monitorizados e respetivos ícones.

Tal como no ecrã “Painel Inicial”, o ecrã “Instalação FV” tem disponível a barra “Outra informação” com a mesma informação desse ecrã. Está também presente, no lado esquerdo, um gráfico de linhas que compara a potência específica da instalação FV com a irradiância normalizada. Por último, no canto inferior direito do ecrã, está disponível um retângulo designado por “Info” que contém informação acerca da potência instalada do sistema FV, da tarifa da energia e do estado de monitorização do contador de energia. Esta informação é configurável através do ecrã das definições. Ainda neste retângulo, existem dois gráficos que alteram o seu estado com a passagem do cursor do rato. A Figura 5-29 ilustra as várias combinações existentes.

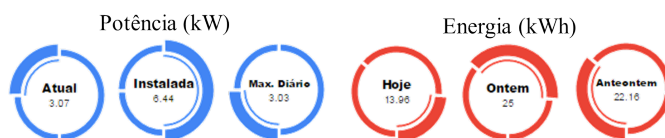


Figura 5-29: Gráficos ilustrativos do valor da potência e da energia produzida pela instalação.

O gráfico azul apresenta os valores da potência ativa atual, da potência instalada do sistema FV e da potência ativa máxima para o dia corrente. O gráfico vermelho apresenta o valor da energia produzida pela instalação para três dias (hoje, ontem e anteontem).

5.3.4 Ecrã de Alarmes

O ecrã “Alarmes”, ilustrado na Figura 5-30, permite ao utilizador consultar os alarmes ativos, assim como todo o histórico de alarmes.

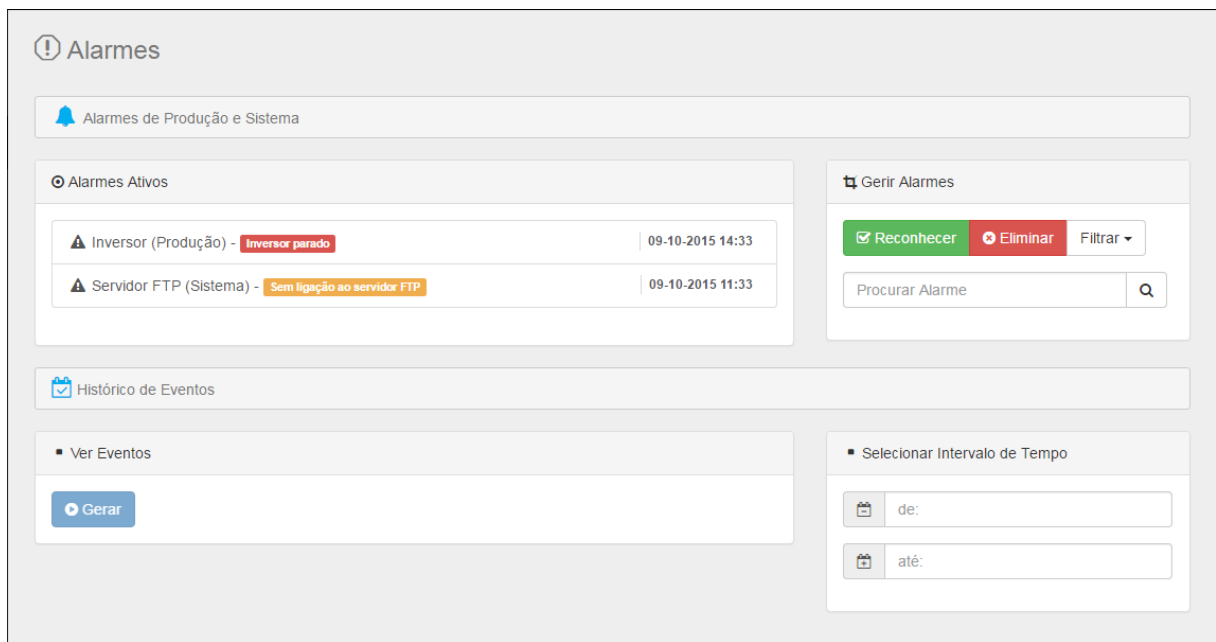


Figura 5-30: Ecrã “Alarmes”.

Este ecrã está dividido em duas áreas:

- Alarmes de Produção e Sistema: área que contém informação referente aos alarmes atualmente ativos;
- Histórico de Eventos: área onde o utilizador pode consultar todo o histórico de alarmes, ocorrido desde que o sistema de monitorização está em funcionamento.

A área dos alarmes de produção e sistema encontra-se subdividida em dois retângulos: o dos alarmes ativos, que apresenta os alarmes que se encontram ativos e o da gestão de alarmes. No retângulo dos alarmes ativos é apresentada a informação relativa à ocorrência do alarme, incluindo a descrição do alarme e a data de início da ocorrência do problema. A descrição é colorida de acordo com o grau de gravidade do problema, ou seja, quando o problema não afetar a produção de energia elétrica, o alarme é sinalizado a amarelo, caso contrário, é sinalizado a vermelho. No retângulo “gerir alarmes”, é possível desativar um alarme (caso o problema já não se verifique), elimina-lo ou ainda procurar por um alarme específico.

A área do histórico de eventos permite consultar todo o histórico de alarmes. Esta consulta é efetuada definindo as datas de início e de fim no retângulo “Selecionar intervalo de tempo”. A definição das datas é feita através de um calendário, tal como mostrado na Figura 5-31.

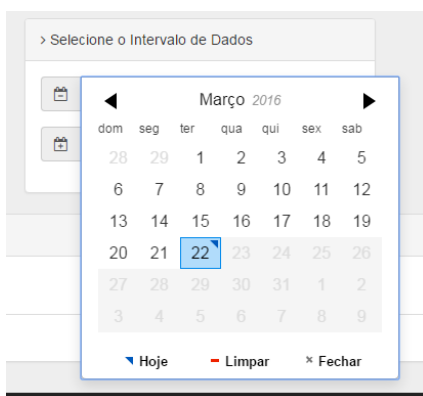


Figura 5-31: Calendário para escolha das datas de consulta dos alarmes.

Ao fim de escolhidas as respectivas datas e após o clique no botão “Gerar”, o utilizador terá acesso a uma tabela com os respetivos dados, como mostra a Figura 5-32.

Ver Eventos

Gerar Eventos de: 2016-03-01 até: 2016-03-22

Pesquisa

Data e Hora	Alarme ID	Equipamento	Descrição	Estado
2016-03-09 07:25:45	106	Inversor	Baixa Produção	Inativo
2016-03-09 07:15:45	106	Inversor	Baixa Produção	Ativo
2016-03-08 18:44:54	105	Sensor Irradiância	Sem Comunicação	Inativo
2016-03-08 18:34:54	105	Sensor Irradiância	Sem Comunicação	Ativo
2016-03-08 18:26:27	104	Inversor	Inversor Parado	Inativo
2016-03-08 07:35:48	104	Inversor	Inversor Parado	Ativo

A mostrar 1 até 10 de 212 linhas registos por página

« < 1 2 3 4 5 > »

Figura 5-32: Exemplo da tabela com o histórico de alarmes.

No canto superior direito da tabela, está disponível uma caixa que permite pesquisar qualquer termo de modo a encontrar facilmente um alarme específico. No lado direito da caixa de pesquisa estão disponíveis três botões. O primeiro botão permite que seja visualizada, ou não, a paginação da tabela. O botão do meio possibilita o acesso aos dados da tabela num formato diferente, como ilustrado na Figura 5-33.

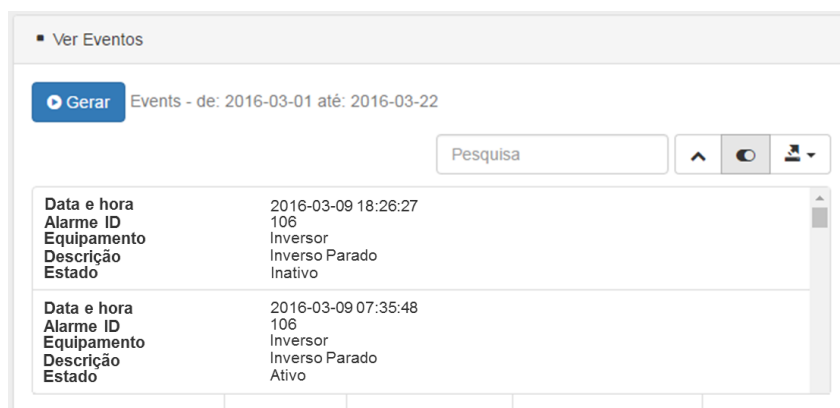


Figura 5-33: Vista secundária para a visualização dos alarmes na tabela de histórico.

Toda a informação presente na tabela está disponível para download num ficheiro csv. Isto pode ser efetuado através do botão para exportação de dados, como mostra a Figura 5-34.



Figura 5-34: Botão utilizado para exportar os alarmes para um ficheiro csv.

O sistema de monitorização permite o envio de notificações relativas à existência de problemas na instalação FV. Esta opção é configurável no ecrã das definições, onde é possível ativar ou desativar as notificações e ainda selecionar um conjunto de alarmes. A Figura 5-35 mostra um exemplo de um email de notificação.

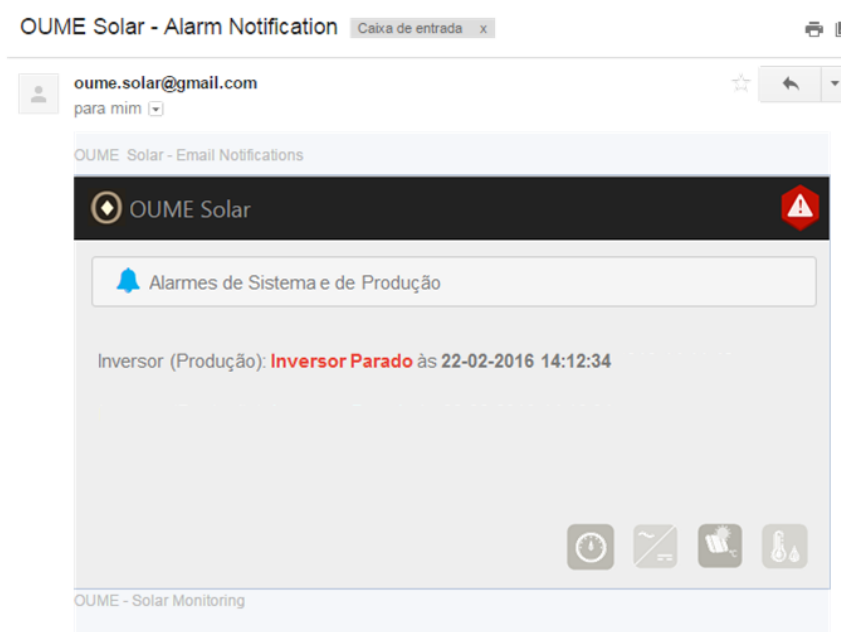


Figura 5-35: Exemplo de uma notificação por email de alarmes ocorridos.

O envio do email de notificação ocorre sempre até um máximo de 10 minutos após a ocorrência do alarme. Contudo, é possível no ecrã “Definições” seleccionar uma opção para que apenas seja enviada uma notificação no final de cada dia, com a lista de todos alarmes ocorridos, referentes a esse dia.

5.3.5 Ecrã do Histórico de Dados

O histórico dos valores das diferentes variáveis monitorizadas está disponível para consulta no ecrã “Histórico de Dados” (Figura 5-36).

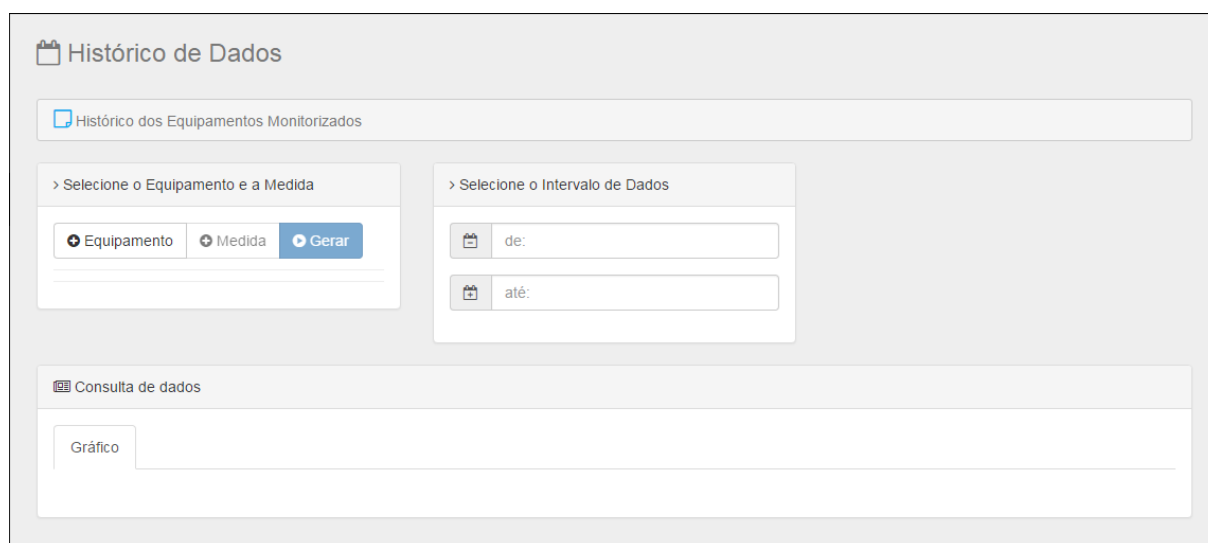


Figura 5-36: Ecrã “Histórico de Dados”.

No ecrã “Histórico de dados” é necessário seleccionar o equipamento, o parâmetro e o intervalo de tempo que pretende consultar. O utilizador deve começar pela escolha do equipamento, uma vez que todas as outras opções se encontram bloqueadas. Após um clique no botão “Equipamento” é mostrada uma lista com os diversos equipamentos monitorizados, a qual é ilustrada na Figura 5-37.



Figura 5-37: Lista de equipamentos para consulta do histórico de dados.

Nesta lista encontra-se também disponível o “equipamento” “Instalação FV”, que permite consultar os diversos indicadores calculados. Após selecionado um equipamento, o botão “Medidas” fica disponível. Este botão permite a escolha das variáveis associadas aos equipamentos. Na Figura 5-38 são apresentados dois exemplos, um em que é escolhido o contador de energia e outro o sensor ambiente.

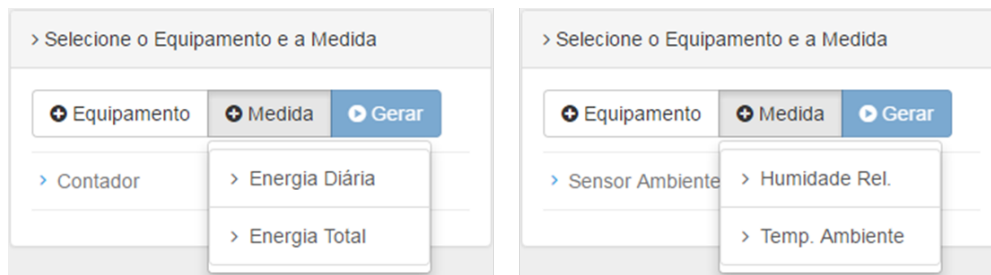


Figura 5-38: Visualização das medidas de acordo com o equipamento escolhido.

Após a escolha do equipamento e da respetiva variável é necessário escolher o intervalo de tempo para o qual se pretende consultar os dados. Por questões relacionadas com o desempenho do sistema de monitorização é possível apenas efetuar consultas de um máximo de 31 dias. Caso o utilizador opte pela escolha de datas em que o número de dias seja superior a 31 dias, será alertado de tal situação, tal como se ilustra na Figura 5-39.

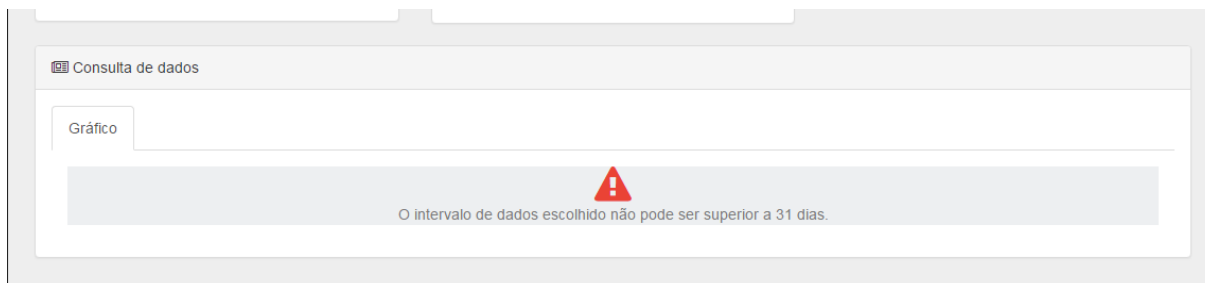


Figura 5-39: Mensagem de alerta após a tentativa de consulta de dados para um intervalo superior a 31 dias.

A título de exemplo foi efetuada uma consulta da potência ativa entre os dias 11-03-2016 e 13-03-2016. Os dados consultados são mostrados através de um gráfico de linhas, tal como se ilustra na Figura 5-40.

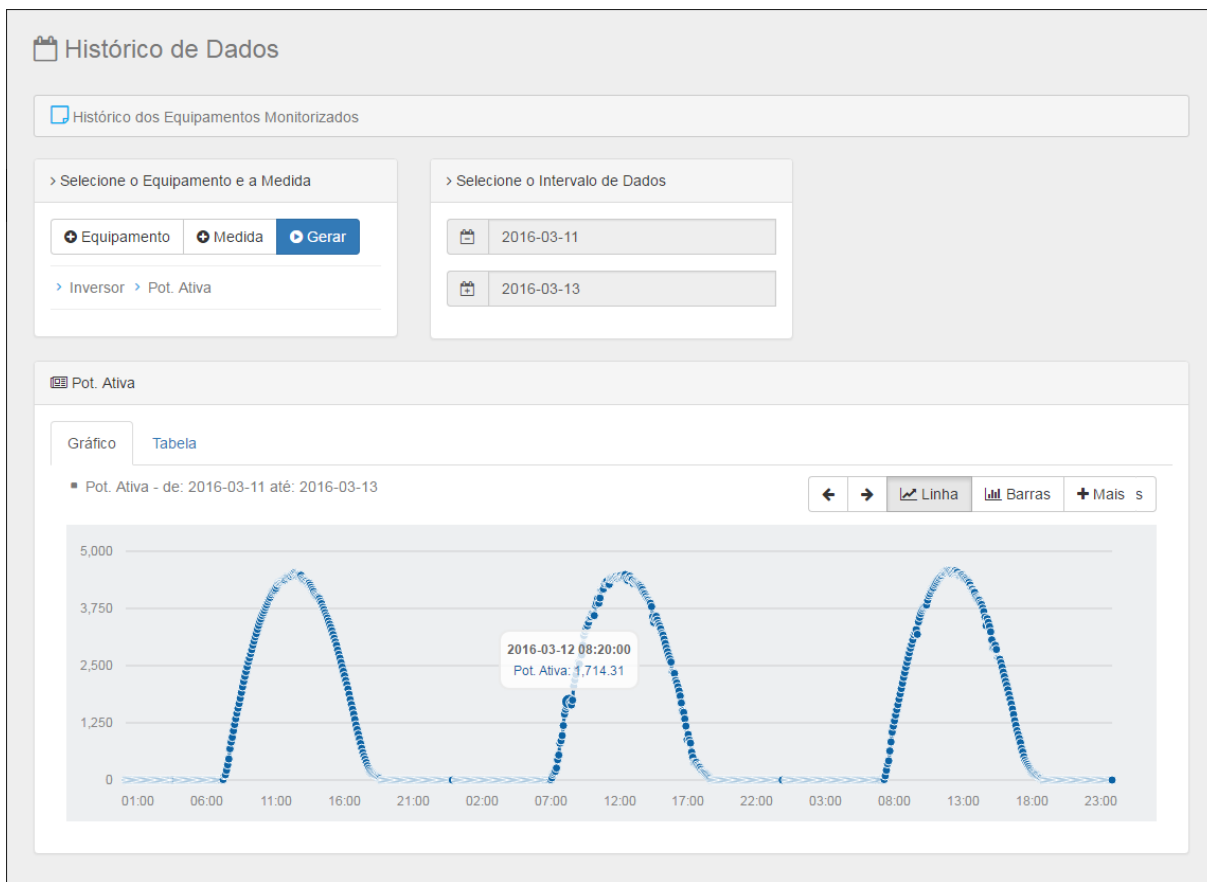


Figura 5-40: Ecrã “Histórico de Dados” após a consulta de dados.

Este gráfico é constituído por um conjunto de pontos representando cada um, o valor referente a um período de 10 minutos. É possível, deslizando o rato sobre estes pontos, ter acesso a uma legenda com o valor da variável e a respetiva data e hora. Na área correspondente ao gráfico está disponível um conjunto de botões que são mostrados na Figura 5-41.



Figura 5-41: Botões da área gráfico.

Estes botões podem ser utilizados para: i) retroceder ou avançar um dia no intervalo de dados escolhido; ii) visualizar gráfico de linhas (omissão); iii) visualizar gráfico de barras; iv) abrir um menu do tipo lista que permite guardar o gráfico como imagem ou proceder à sua impressão. Caso seja clicado o botão “Barras”, o gráfico de linhas altera o seu formato para um gráfico de barras, como ilustrado na Figura 5-42.

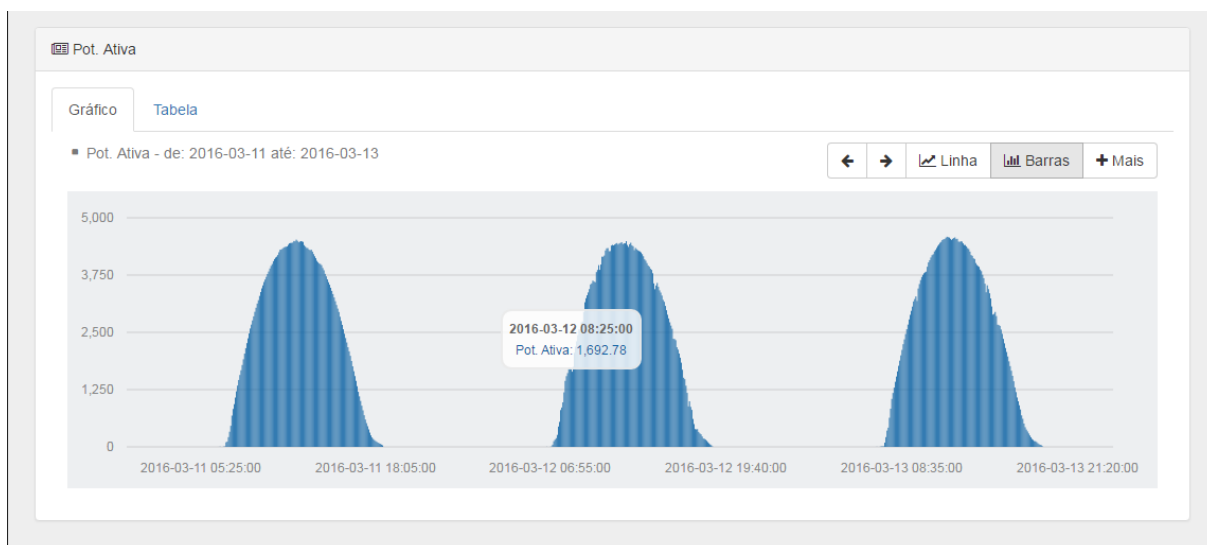


Figura 5-42: Gráfico de barras da consulta de dados efetuada.

O histórico das grandezas pode também ser consultado a partir de uma tabela (ver Figura 5-43), que fica disponível após ser clicado no botão “Tabela”.

Data e hora	Potência ativa
2016-03-11 10:05:00	3653.22
2016-03-11 10:10:00	3711.19
2016-03-11 10:15:00	3774.09
2016-03-11 10:20:00	3828.62
2016-03-11 10:25:00	3893.07

Figura 5-43: Histórico de dados em formato tabela.

Como é possível verificar pela imagem anterior, está disponível uma caixa de pesquisa e um conjunto de botões com as mesmas funções que as referidas na tabela do histórico de alarmes. A caixa permite a pesquisa por uma data e hora específicas ou por um valor específico da variável. É também permitido exportar os dados para um ficheiro csv (ver Figura 5-44). Neste caso, o limite dos 31 dias não é aplicado, sendo possível o exportação dos dados até um intervalo máximo de 6 meses. Um exemplo do conteúdo do ficheiro csv é mostrado na Quadro 5-9.

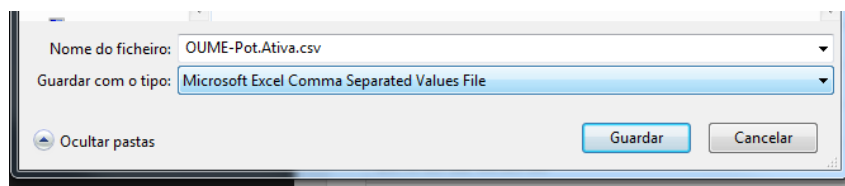


Figura 5-44: Exportação de dados para um ficheiro csv.

Quadro 5-9: Exemplo do conteúdo do ficheiro csv.

Data	Hora	Pot.Ativa
22-03-2015	00:00:00	0.00
22-03-2015	00:10:00	0.00
22-03-2015	00:20:00	0.00
22-03-2015	00:30:00	0.00
22-03-2015	00:40:00	0.00

5.3.6 Ecrã “Configuração da Instalação”

O ecrã “Configuração da Instalação”, ilustrado na Figura 5-45, contém um conjunto de configurações referentes à instalação FV.

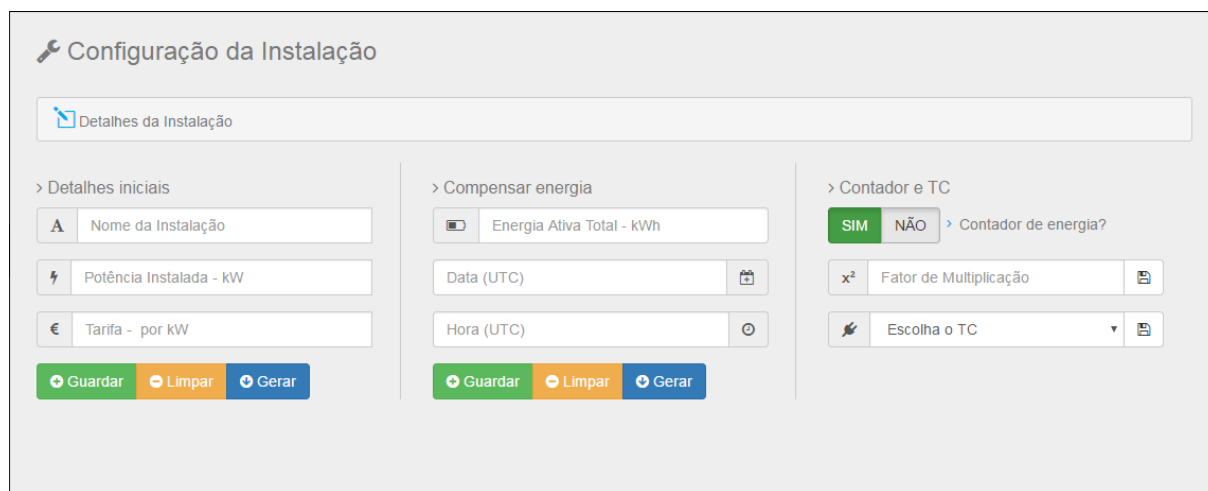


Figura 5-45: Ecrã “Configuração da Instalação”.

Esta página encontra-se dividida em três áreas distintas: “Detalhes iniciais”, “Compensar energia” e “Contador e TC”.

Na área “Detalhes Iniciais” é possível: i) alterar a designação do sistema FV, o qual aparece no ecrã “Instalação FV”; ii) definir a potência instalada, utilizada no cálculo de vários indicadores; iii) e definir a tarifa de energia, utilizada para cálculos dos proveitos diários e totais.

Estão também presentes três botões, a saber: i) o botão guardar, que permite guardar as configurações efetuadas; ii) o botão limpar, que permite apagar o texto introduzido nas caixas de configuração; iii) e o botão gerar, que permite ao utilizador ver as configurações atuais, tal como mostrado na Figura 5-46.

Figura 5-46: Consulta dos detalhes iniciais atuais.

Na área “Compensar energia” é possível introduzir um offset de energia, o qual permite adicionar a quantidade de energia já produzida pelo sistema FV antes da instalação do Oume Solar. Esta adição é associada à data a que diz respeito. Este valor é utilizado nos cálculos da energia total e consequentes proveitos totais. Na Figura 5-47 é apresentado um exemplo de adição de um offset de 100 kWh.

Figura 5-47: Adição de um offset de energia de 100 kWh.

Na área “Contador e TC” é possível ativar ou desativar a leitura dos pulsos de luz do contador de energia. Caso esta monitorização exista, é necessário definir qual o fator multiplicativo do contador (pulsos de luz por kWh). Se esta opção não estiver ativa é apresentada, no ecrã, a indicação mostrada na Figura 5-48.

Figura 5-48: Botão com a indicação que não está a ser efetuada a monitorização dos pulsos de luz do contador.

Nesta área, encontra-se também presente um menu do tipo lista que permite configurar o modelo

do TC utilizado. Por omissão, este modelo é o STC-013-030. A Figura 5-49 mostra a lista com as diferentes possibilidades de escolha.

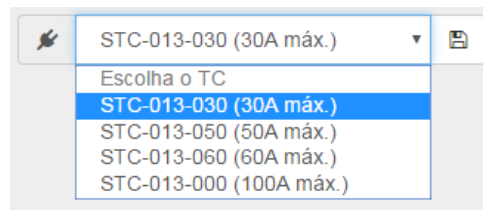


Figura 5-49: Menu do tipo lista para a escolha do TC a utilizar.

5.3.7 Ecrã Definições

No ecrã “Definições” é possível definir um conjunto de configurações essenciais para o funcionamento do sistema de monitorização. Este ecrã é apresentado na Figura 5-50.

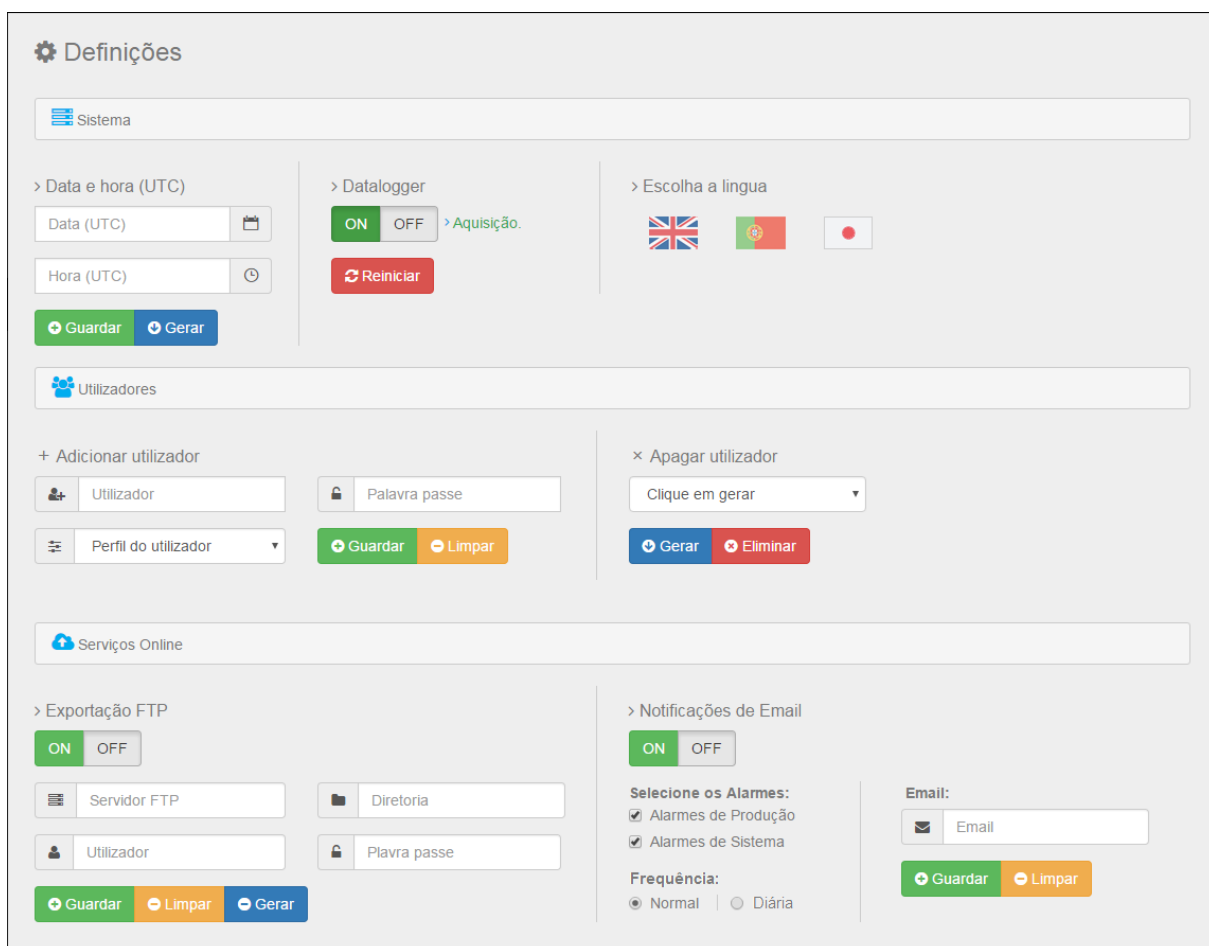


Figura 5-50: Ecrã “Definições”.

Este ecrã está dividido em três áreas: “Sistema”, “Utilizadores” e “Serviços online”.

A área “Sistema” permite ajustar a data e hora do sistema de monitorização. A Figura 5-51 ilustra o relógio que aparece para a escolha da hora.

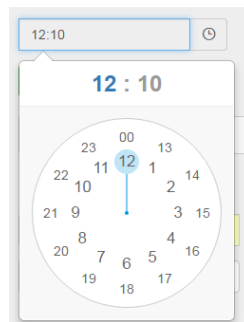


Figura 5-51: Relógio para escolha da hora.

É também possível ativar ou parar a recolha de dados ou reiniciar o sistema de monitorização. Uma vez que a reinicialização do sistema ou a paragem da recolha se traduz numa perda de dados, o utilizador é questionado acerca da opção tomada, através de uma mensagem de alerta, tal como ilustrado na Figura 5-52.

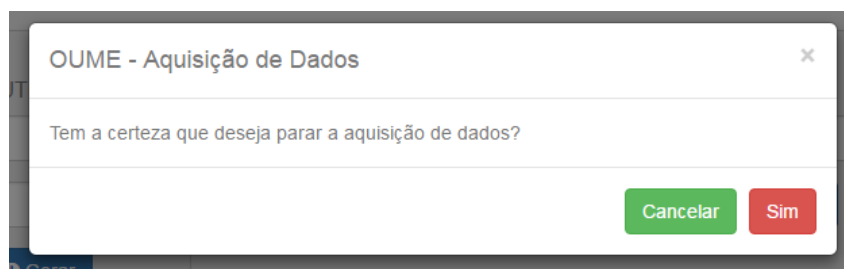


Figura 5-52: Alerta após tentativa de paragem da aquisição de dados.

Por último, esta área permite a escolha da língua de apresentação da interface.

Na área “Utilizadores” é efetuada a gestão dos acessos à plataforma Web. É possível alterar ou eliminar um determinado acesso. Na adição de um novo acesso é necessário introduzir um nome de utilizador, a palavra passe e o nível de acesso pretendido (ver Figura 5-53).

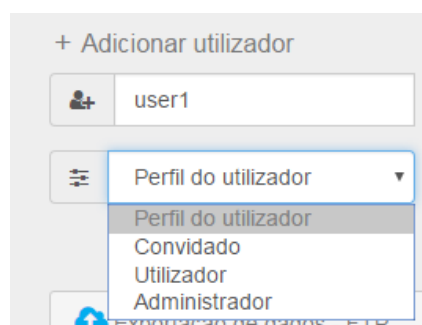


Figura 5-53: Lista com os níveis de acesso dos utilizadores.

No formulário de adição de novos acessos existem determinadas proteções para evitar utilizadores duplicados, sem palavra passe ou sem nível de acesso. Como exemplo, na Figura 5-54 é ilustrada a situação de quando se pretende adicionar um utilizador com um nome já existente.

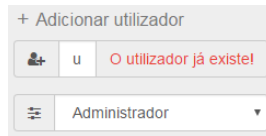


Figura 5-54: Erro após tentativa de introdução de um utilizador com nome já existente.

Na Figura 5-55 é simulada a situação em que é feita uma tentativa para guardar um utilizador sem palavra passe.

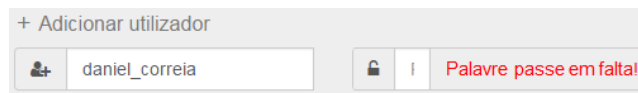


Figura 5-55: Erro após tentativa de introdução de um utilizador sem palavra passe.

Caso se pretenda eliminar um acesso é necessário clicar no botão “Gerar” onde será carregada a lista de utilizadores existentes. Desta lista é escolhido um utilizador, que é eliminado após o clique no botão “Eliminar”. Este processo é apresentado na Figura 5-56, onde se ilustram os respetivos passos efetuados.

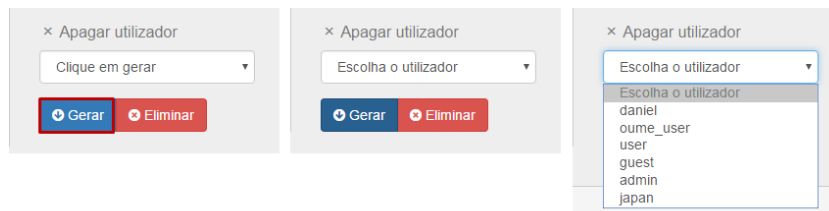


Figura 5-56: Processo para eliminar um utilizador de acesso ao sistema de monitorização.

Na área “Serviços Online” está disponível um conjunto de campos que permitem a configuração do envio de dados para um servidor FTP e a configuração das notificações de email. Nas configurações do envio dos dados por FTP é necessário ativar esta opção assim como colocar as credenciais do servidor, (endereço do servidor, diretoria, utilizador e palavra passe). Relativamente às notificações, é necessário introduzir o email para o qual se pretende o envio, escolher quais os tipos de alarmes que originam notificação e configurar a frequência de envio destas notificações.

5.3.8 Ecrã “Estado do Sistema”

No ecrã “Estado do Sistema”, ilustrado na Figura 5-57, o utilizador tem acesso à informação referente ao computador Raspberry Pi.

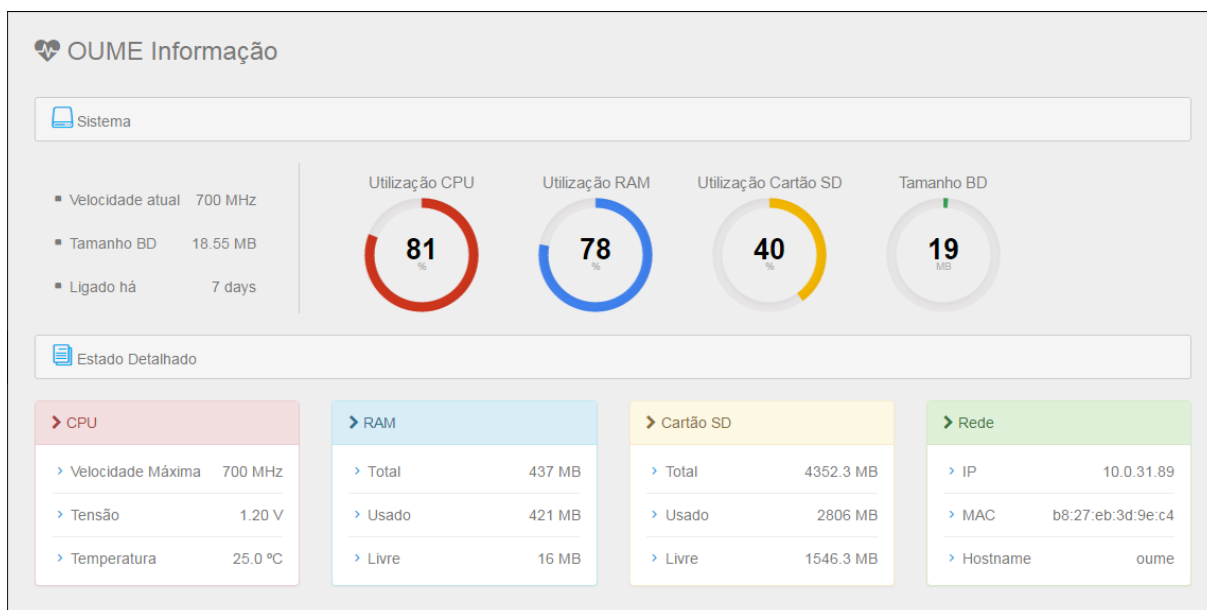


Figura 5-57: Ecrã “Estado do Sistema”.

Neste ecrã é possível a consulta gráfica da utilização do CPU, memória RAM, cartão de memória e da base de dados. Está, também, presente uma área com informação mais detalhada dividida em quatro blocos correspondentes ao CPU, RAM, cartão SD e rede.

5.4 Integração com o OMS

O sistema de monitorização foi desenvolvido por forma a permitir a integração com o sistema central de supervisão da Martifer Solar. Esta opção é, tal como mostrada anteriormente, ativada e configurada no ecrã “Definições”. Esta integração permite que os dados monitorizados pelo Oume Solar sejam processado pelo OMS.

Ao servidor FTP de destino chegará um ficheiro com conteúdo semelhante ao mostrado no Figura 5-58.

Date	Time	VoltageUn	CurrentL	ACPower	PowerFactor	ApparentePower	IrradianceInc	ModuleTemp	AmbientTemp	HumidityRel	Edaily
13-10-2015	12:40:00	236.45	16.11	3809.21	1.00	3809.21	611.68	30.48	25.00	39.80	16.99
13-10-2015	12:30:00	239.97	16.34	3921.11	1.00	3921.11	619.06	30.55	24.70	39.70	16.35
13-10-2015	12:20:00	239.77	16.66	3994.57	1.00	3994.57	618.73	28.05	24.10	39.00	15.70
13-10-2015	12:10:00	238.75	16.78	4006.23	1.00	4006.23	628.45	29.07	24.10	39.90	15.03
13-10-2015	12:00:00	239.41	16.86	4036.45	1.00	4036.45	635.61	30.25	24.10	42.00	14.36

Figura 5-58: Exemplo de uma parte do ficheiro csv enviado.

Na Figura 5-59 são mostrados, no sistema OMS, os dados monitorizados pelo Oume Solar referentes à instalação utilizada para teste.

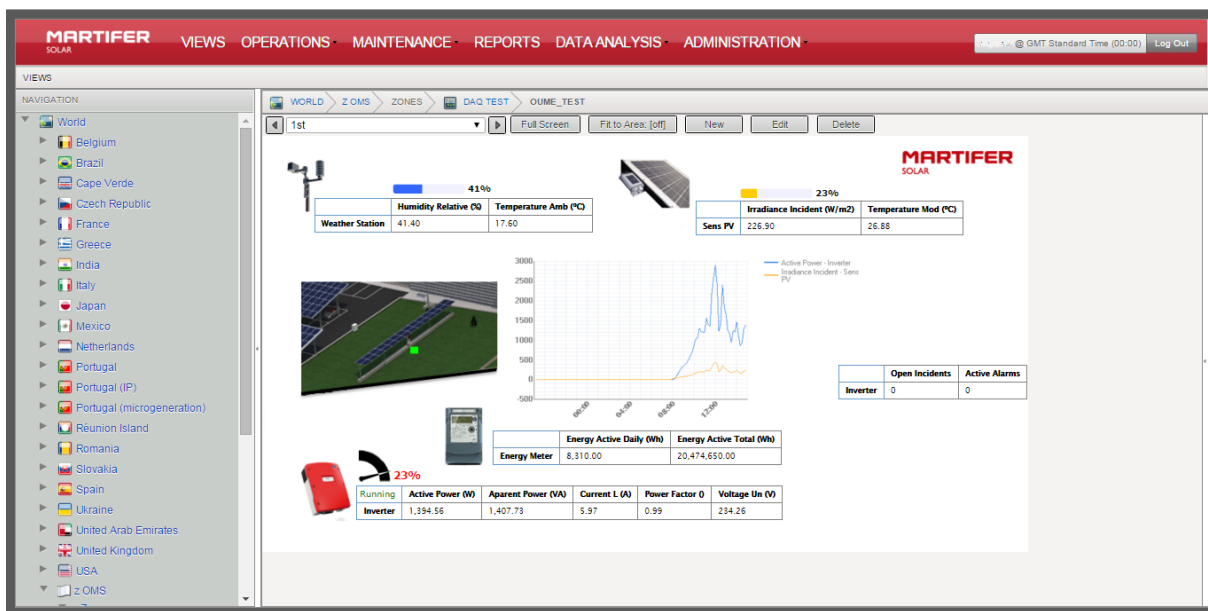


Figura 5-59: Visualização dos dados monitorizados pelo Oume Solar no OMS.

A informação presente no OMS é atualizada a cada 10 minutos, a partir do ficheiro csv enviado pelo Oume Solar, para o servidor FTP da Martifer Solar.

6. Conclusões

Motivado pela proliferação dos pequenos sistemas fotovoltaicos e pela necessidade de melhoria do seu desempenho técnico-económico, através da existência de soluções que permitam monitorizar e analisar o seu comportamento, esta dissertação foi desenvolvida com o intuito de apresentar uma solução simples e eficiente na monitorização destes pequenos sistemas FV.

6.1 Trabalho Desenvolvido

Foi possível desenvolver um sistema de baixo custo que cumpriu com todos os objetivos inicialmente propostos, permitindo assim a monitorização de instalações FV de pequena dimensão dotadas de um inversor monofásico.

A solução de monitorização contemplou a necessidade de desenvolvimento de hardware e de software. Relativamente ao hardware foi desenvolvido um *datalogger* e diversos sensores para a aquisição dos vários parâmetros elétricos e meteorológicos necessários à monitorização de uma instalação FV. O *datalogger* é constituído pelo computador Raspberry Pi e uma placa de aquisição de dados para a ligação dos sensores. Importa salientar o desenvolvimento do sensor para a medição da irradiância solar, construído com base na utilização de uma célula FV de silício policristalino.

Quanto ao software, foi necessário desenvolver algoritmos para a aquisição de dados, algoritmos para a gestão da base de dados, algoritmos para executar tarefas auxiliares e uma

interface gráfica em ambiente Web.

Todos os dados recolhidos pela Oume Solar são armazenados numa base de dados, ficando disponíveis para consulta através da interface Web desenvolvida. Esta interface, desenvolvida em HTML, adapta-se aos diferentes tamanhos de ecrãs, permitindo assim uma visualização adequada dos dados do sistema FV através de um navegador Web e em qualquer dispositivo (computador, tablet e smartphone). A interface disponibilizada, está organizada em diferentes ecrãs, o que permite, de forma simples, a consulta de informação relevante referente à instalação FV monitorizada.

Por forma a testar o funcionamento da solução desenvolvida, em ambiente real, o sistema de monitorização foi colocado a monitorizar uma pequena instalação localizada no Campus Tecnológico da Martifer Solar. O sistema encontra-se a funcionar sem interrupções involuntárias desde Julho de 2015, o que demonstra a robustez do hardware e software desenvolvidos. Foram ainda comparados diversos valores obtidos pelo Oume Solar e pelo Solar-Log 1000, que permitiram perceber a qualidade dos dados adquiridos pelo sistema de monitorização desenvolvido.

A integração do sistema de monitorização com o centro de supervisão da Martifer Solar, foi bem sucedida. O ficheiro, enviado pelo Oume Solar, permite que o OMS atualize os dados com uma frequência de 10 minutos. Esta opção, encontra-se ativada desde Agosto de 2015, não tendo ocorrido falhas desde então.

Devido ao acordo de confidencialidade com a empresa Martifer Solar, o código utilizado no desenvolvimento de todo o software, não é disponibilizado nesta dissertação.

6.2 Trabalhos Futuros

Embora os resultados apresentados tenham alcançado os objetivos propostos, a plataforma de monitorização pode ser desenvolvida e otimizada em diversos aspetos:

1. Adequação do hardware desenvolvido para a utilização comercial.
2. Monitorização de inversores trifásicos, através da inclusão de 3 TCs.
3. Monitorização de equipamentos fotovoltaicos utilizando o protocolo Modbus (RTU e TCT/IP).
4. Ligação à Internet através de um Modem GSM.

5. Otimização da interface gráfica para o regime de autoconsumo.
6. Inclusão de um sensor de irradiância de menores dimensões e otimização do algoritmo utilizado para o cálculo da irradiância.
7. Implementação do envio de notificações através de uma sms.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Cristaldi, M. Faifer, A. Ferrero, and A. Nechifor, “On-line monitoring of the efficiency of photo-voltaic panels for optimizing maintenance scheduling,” in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE*. IEEE, 2010, pp. 954–959.
- [2] E. commission. 2030 framework for climate and energy policies. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm
- [3] M. da Economia e da Inovação, *Decreto Lei nº 363/2007*. Diário da República nº 202 1ª série, 2007.
- [4] d. I. e. d. D. Ministério da Economia, *Decreto Lei nº 118-A/2010 de 25 de Outubro*. Diário da República nº 207 1ª série, 2010.
- [5] o. d. T. e. E. Ministério do Ambiente, *Decreto Lei nº 153/2014 de 20 de Outubro*. Diário da República nº 202 1ª série, 2014.
- [6] S. de registo da microprodução, *Unidades de microprodução ligada a rede - Distribuição por distrito, concelho e tipo de fonte*. Renováveis na Hora, 2014.
- [7] A. Goetzberger and V. U. Hoffmann, *Photovoltaic solar energy generation*. Springer Science & Business Media, 2005, vol. 112.
- [8] I. Commission *et al.*, “International standard iec 61724: Photovoltaic system performance monitoring guidelines for measurements, data exchange and analysis,” *IEC*, 1998.
- [9] E. Kymakis, S. Kalykakis, and T. M. Papazoglou, “Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 3, pp. 433–438, 2009.
- [10] J. Perdigoto and A. d. C. Carvalho, “Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico 2010,” *Instituto Nacional de Estatística, IP*, p. 117, 2011.
- [11] P. Bertoldi, D. B. Cayuela, S. Monni, and R. P. de Raveschoot, “How to develop a sustainable energy action plan (seap),” 2010.
- [12] I. A. B. Santos and N. Silva, *Sistemas de supervisão: SCADA EMS e DMS*, 2009.
- [13] P. M. B. Moreira, “Sistema de supervisão e controlo de estruturas,” Ph.D. dissertation, Universidade do Porto, 2011.

REFERÊNCIAS

- [14] Saitim. Piensa solar. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: http://www.saitim.com/?page_id=204
- [15] Skytron. Pvguard. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://www.skytron-energy.com/en/system/supervision-software/pv-scada-software-pvguard/>
- [16] Solar-Log. Solar-log 2000. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://www.solar-log.com/en/products-solutions/solar-log-2000/overview.html>
- [17] SMA. Sunny webbox. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://www.sma-america.com/products/monitoring-control/sunny-webbox.html>
- [18] Higeeco. Gwc v2. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://www.higeeco.com/wp-content/uploads/2014/01/GWC-SOLAR.pdf>
- [19] Meteocontrol. Web'log. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://www.meteocontrol.com/en/industrial-line/data-logger-weblogs/weblog/>
- [20] Efergy. Engage solar kit. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://efergy.com/eu/engage-solar>
- [21] O. E. Monitor. emontx v3. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://openenergymonitor.org/emon/modules/emonTxV3>
- [22] Cicutor. Wibeec. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://wibeec.cicutor.com/>
- [23] TED. Ted home pro. Accessed: 01 2015. [Online]. Available: <http://www.theenergydetective.com/prohome>
- [24] ArduinoBR. I2c protocolo de comunicação. Acedido: 03 2015. [Online]. Available: <http://www.arduino.br.com/arduino/i2c-protocolo-de-comunicacao/>
- [25] L. de Garagem. Tutorial: Comunicação spi (serial peripheral interface) com arduino. Acedido: 03 2015. [Online]. Available: <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-comunica-o-spi-serial-peripheral-interface-com-arduino>
- [26] *TSL257 High-Sensitivity Light-to-Voltage Converter*, TAOS, 9 2007.
- [27] M. da Economia e da Inovação, *Regulamento nº 455/2013*. Diário da República 2ª série - N 232, 2013.
- [28] OpenEnergyMonitor. Emonlib. Acedido: 03 2015. [Online]. Available: <https://github.com/openenergymonitor/EmonLib>
- [29] Adafruit. Python library to read the dht series. Acedido: 04 2015. [Online]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_DHT

APÊNDICE A

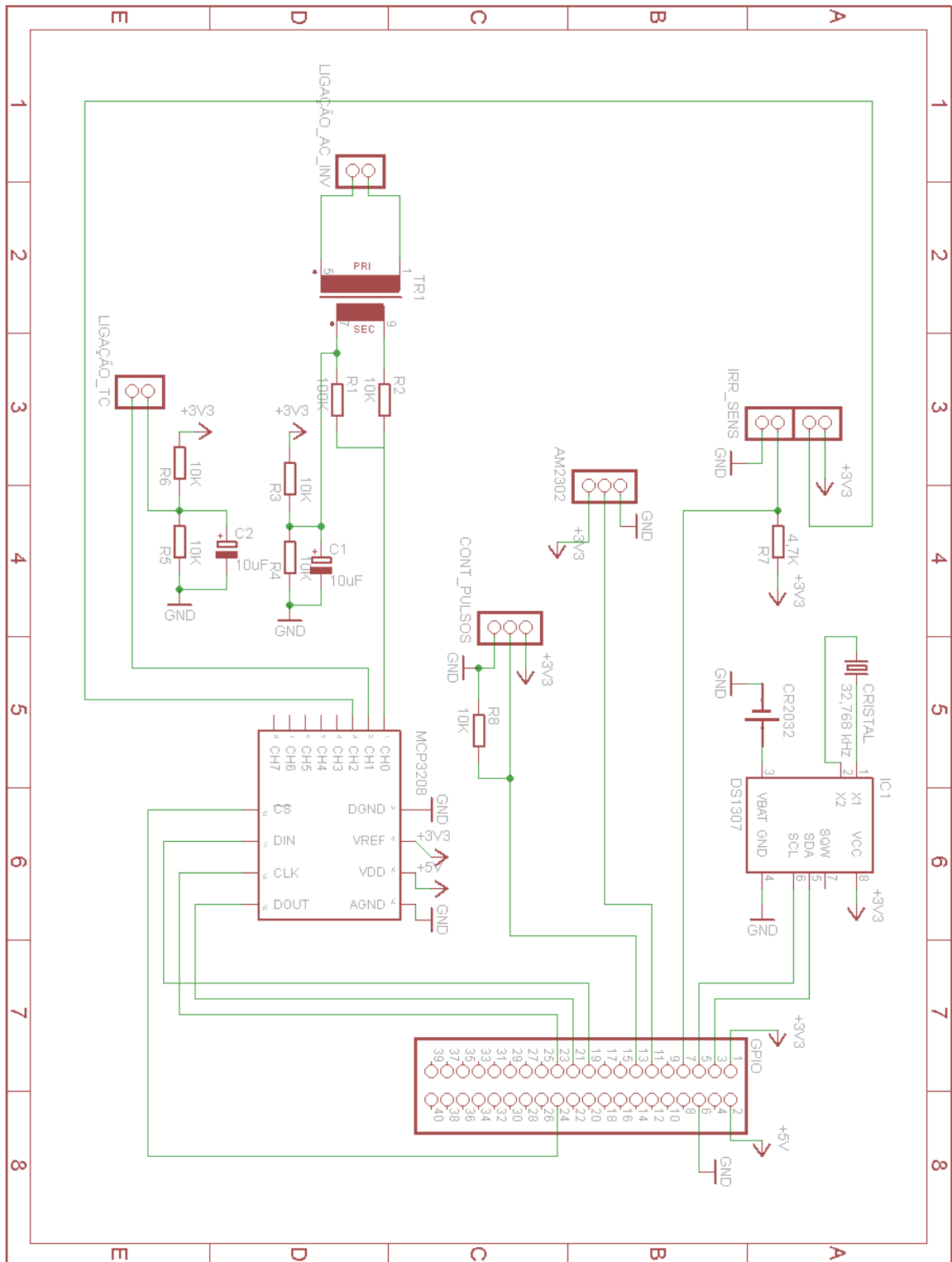


Figura A-1: Esquema elétrico do hardware utilizado.

APÊNDICE B

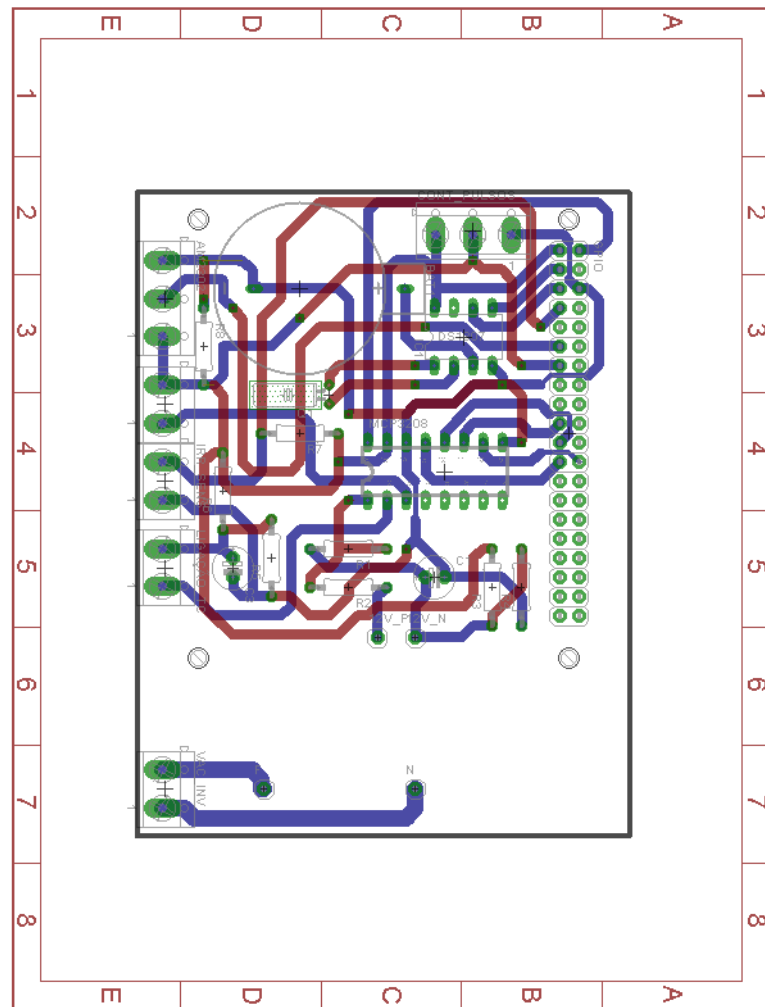


Figura B-1: Desenho da placa de circuito impresso desenvolvida.

APÊNDICE C

Neste anexo são apresentados os métodos matemáticos utilizados pela biblioteca EmonLib para o cálculo da potência ativa, tensão eficaz, corrente eficaz, potência aparente e fator de potência.

Potência Ativa

A potência ativa é calculada pela Equação C.1.

$$P \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) \times i(n) \quad (\text{C.1})$$

Onde:

- $u(n)$ corresponde ao valor de uma amostra de $u(t)$;
- $i(n)$ corresponde ao valor de uma amostra de $i(t)$;
- N é o número de amostras.

Tensão RMS e Corrente RMS

A tensão RMS é calculada pela equação C.2.

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} u^2(n)}{N}} \quad (\text{C.2})$$

Onde:

- $u(n)$ corresponde ao valor de uma amostra de $u(t)$;
- $i(n)$ corresponde ao valor de uma amostra de $i(t)$;
- N é o número de amostras.

A corrente RMS utiliza a mesma equação, substituindo as amostras da tensão $u(n)$, por amostras da corrente $i(n)$.

Potência Aparente e Fator de Potência

A potência aparente é dada pela Equação C.3

$$S = U_{rms} \times I_{rms} \quad (\text{C.3})$$

Onde:

- U_{rms} é o valor eficaz da tensão;
- I_{rms} é o valor eficaz da corrente.

O fator de potência é calculado através da Equação C.4.

$$\cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (\text{C.4})$$

Onde:

- P é o valor da potência ativa;
- S é o valor da potência aparente.