



Elaboração de Especificação Técnica do Sistema de Supervisão, Monitorização e Controlo aplicado a Centrais Fotovoltaicas

José Luís Mota Pacheco de Oliveira Monteiro

PARA APRECIÇÃO POR JÚRI

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João P. S. Catalão

Coorientador: Prof. Doutor Gerardo J. Osório

Janeiro de 2025

Abstract

The growing use of renewable energies demands technological solutions that keep pace with this evolution and enable efficient utilization of these resources. Portugal is integrating into this energy transition with ambitious goals and an increasing focus on sustainable production, particularly centered on solar energy.

This study aims to create the technical specification for the supervision, monitoring, and control system applied to photovoltaic power plants, with the goal of detailing the components necessary to ensure the proper functioning of solar parks, establishing standardized technical documentation that serves as a reference for the integration and interconnection of components within the park, as well as ensuring communication between the various elements and the supervisory system, also known as the *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) system.

The main objective of the dissertation is to develop a detailed document for the specification of a SCADA system, addressing its needs and functionalities, as well as the system's components and their interconnection within a photovoltaic power plant. Furthermore, the functional and non-functional requirements of the system are discussed, with an emphasis on defining the necessary functionalities for efficient and secure management of photovoltaic parks, and the needs that the system must meet to ensure its proper operation.

To achieve this, the starting point for this dissertation is the understanding of SCADA systems in general, a technology widely used in various industries, but with specific characteristics in the context of solar energy. The dissertation reflects on the need to adapt SCADA systems to the reality of photovoltaic power plants, considering the specifics of solar energy production. The work also addresses the importance of network architecture and communication protocols to ensure the secure and fault-free transmission of vital information.

Additionally, this dissertation aims to highlight the contribution that the SCADA system can bring to increased operational efficiency and the reduction of failures, while enhancing the exploitation of photovoltaic potential. Through better adaptation and integration of the SCADA system, the company will be able to optimize the performance of solar parks, enabling more efficient management, a more agile response to market needs, and, as a result, higher profitability.

The research reveals that the SCADA system significantly contributes to energy efficiency and increased profitability, being an essential component in the operation of photovoltaic solar parks. Therefore, the work aims to provide a solid foundation for future implementations of SCADA systems in solar energy, contributing to the standardization and continuous optimization of this technology.

Keywords: Photovoltaic Power Plants, SCADA Systems, Solar Energy, Energy Management, Renewable Energy, Industrial Automation, Communication Architecture.

Resumo

O crescente uso de energias renováveis exige soluções tecnológicas que acompanhem esta evolução e permitam aproveitar estes recursos de forma eficiente. Portugal está a integrar-se nesta transição energética com metas ambiciosas e um foco crescente na produção sustentável, especialmente centrado na energia solar.

Este estudo visa criar a especificação técnica do sistema de supervisão, monitorização e controlo aplicado a centrais fotovoltaicas, com o objetivo de detalhar as componentes necessárias para garantir o bom funcionamento dos parques solares, estabelecendo uma documentação técnica padronizada que sirva como referência para a integração e interligação das componentes no parque, além de assegurar a comunicação entre os diversos elementos e o sistema de supervisão, também conhecido como sistema *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA).

O objetivo principal da dissertação é elaborar um documento detalhado para a especificação de um sistema SCADA, abordando as suas necessidades e funcionalidades, bem como os componentes do sistema e a sua interligação dentro de uma central fotovoltaica. Além disso, são abordados os requisitos funcionais e não funcionais do sistema, com ênfase na definição das funcionalidades necessárias para uma gestão eficiente e segura dos parques fotovoltaicos, e nas necessidades que o sistema deve atender para garantir o seu funcionamento correto.

Para tal, o ponto de partida para esta dissertação é a compreensão dos sistemas SCADA na sua generalidade, uma tecnologia amplamente utilizada em diversas indústrias, mas que apresenta características específicas no contexto da energia solar. A dissertação reflete sobre a necessidade de adaptação dos sistemas SCADA à realidade das centrais fotovoltaicas, considerando as especificidades da produção energética solar. O trabalho também aborda a importância da arquitetura de rede e dos protocolos de comunicação para garantir a transmissão segura e sem falhas da informação vital.

Além disso, esta dissertação visa destacar a contribuição que o sistema SCADA pode trazer para o aumento da eficiência operacional e a redução de falhas, ao mesmo tempo que potencializa a exploração do potencial fotovoltaico. Através da melhor adaptação e integração do sistema SCADA, a empresa será capaz de otimizar o desempenho dos parques solares, permitindo uma gestão mais eficiente, uma resposta mais ágil às necessidades do mercado e, como resultado, uma geração maior de lucros para a empresa.

A investigação revela que o sistema SCADA contribui significativamente para a eficiência energética e o aumento da rentabilidade, sendo uma componente essencial na operação de parques solares fotovoltaicos. Assim, o trabalho visa fornecer uma base sólida para futuras implementações de sistemas SCADA em energia solar, contribuindo para a padronização e otimização contínua desta tecnologia.

Palavras-chave: Centrais Fotovoltaicas, Sistemas SCADA, Energia Solar, Gestão de Energia, Energias Renováveis, Automação Industrial, Arquitetura de Comunicações.

Agradecimentos

Desde já e começando assim este texto de agradecimento, quero revelar a minha satisfação com o meu percurso nos últimos seis anos. Em Abril de 2019, entrei na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) pela primeira vez, acredito que foi a primeira, fazendo parte de uma iniciativa de apresentação ao curso que eventualmente iria escolher. Nesse dia, olhei para o momento com um "Até Breve"e, em Setembro do mesmo ano, encontro-me na faculdade que escolhi e onde acabei tornando-me Homem.

Desde a entrada na faculdade, a minha vida e a forma como vejo o que me rodeia mudou muito, conheci realidades que desconhecia, fui presenteado com momentos e experiências únicas, fui muito feliz. Acima de tudo, estes últimos anos foram de desenvolvimento pessoal, muita coisa não correu como previa, mas isso é bom, é a vida a acontecer. Estes últimos anos eu cimente as bases do meu ser e conheci-me, percebi o que quero mostrar para o mundo exterior e quem eu, efetivamente, sou e pretendo ser.

Num voto de agradecimento, quero deixar a minha palavra de apreço ao professor João Catalão por ter aceitado a minha proposta de dissertação e ter auxiliado em todo o processo. De seguida, aproveito para agradecer ao professor Gerardo Osório por todo o suporte na redação da dissertação, tendo sido a sua ajuda crucial.

Ainda no que toca à dissertação, o meu obrigado à Jayme da Costa (JdC) por ter aceitado o meu desafio e ter proposto um tema que tanto me interessou investir o meu tempo. Quero agradecer por toda a ajuda, apoio e acima de tudo, agradecer a integração na empresa a todos os colaboradores da JdC, em especial, ao meu supervisor, engenheiro Duarte Afonso, desde cedo criando um ambiente de suporte e autonomia, criando as condições necessárias para a execução das tarefas. Deixo também o meu apreço aos engenheiros José Coelho e José Queirós, por terem acompanhado e auxiliado nesta investigação sempre que necessitei, tornando todo o processo mais eficiente.

Aproveitando este momento final, onde termino a minha caminhada como estudante, quero aproveitar agradecendo aos meus pais, me permitiram caminhar nestes trilhos da Universidade e que me incentivaram a lutar pelos meus objetivos, pessoais e académicos, a investir no meu futuro, porém não só o aproveitamento escolar, mas também, e destacando essa importância, o aproveitamento do que é ser estudante e do que isso proporciona de único, por isto tudo, o meu eterno obrigado. Aproveito para agradecer ao meu irmão mais novo, pelo apoio, sempre à sua maneira, e pelo companheirismo ao longo destes anos, que a vida nos mantenha próximos como hoje somos.

Por fim, um obrigado a toda a minha família desde tios, tias, primos e primas, em especial aos meus avós, podendo alguns acompanhar, de alguma forma, esta caminhada. Noutros casos, que o seu legado tenha servido de inspiração para mim, estando eu a percorrer esta vida muito a partir do seu trabalho prévio.

Com o mais sincero obrigado, quero aproveitar para agradecer aos meus dois grandes amigos de vida, meus companheiros há mais de uma década, há quem diga que não haja um pico, um momento mais elevado, um *prime* para esta conexão que a gente nutre, sendo que ela mantém se intocável estes anos todos. Ao meu amigo Fernando Moreira e ao meu amigo Mário Neves, que bom que é poder acompanhar de perto o vosso crescimento, ao longo de tantos anos de conversas, desabafos, vivências juntos, momentos de felicidade pura e de amizade real, compromisso real em ver o outro no seu melhor.

De seguida, agradecer a todas as pessoas que conheci na faculdade, em especial, aos meus colegas de curso ao longo destes anos de faculdade e a todos os amigos que fiz a partir da Associação de Estudantes da FEUP (AEFEUP), tendo sido uma parte muito importante na minha formação como adulto.

Não enumerando muitos nomes, mas sendo impossível não o fazer... um grande abraço aos meus dois grandes amigos e companheiros de Electro, Hugo Cardoso e Rodrigo Pinho, respetivamente, meus principais parceiros na licenciatura e no mestrado, acompanhando muitas das minhas frustrações, mas acima de tudo felicidade e conquistas.

Em relação ao meu percurso na AEFEUP, permitiu-me organizar eventos dos quais me orgulho muito, onde desenvolvi capacidades de resolução de problemas, gestão de expectativas e organização de pessoas. Destacando o evento *FEUPSounds*, onde pude apresentar-me ao público como músico e, ao mesmo, dar a oportunidade a diversos talentos espalhados pela Universidade, tendo sido um dia muito importante na minha vida e na dos presentes. Ao pertencer a esta associação, conheci imensas pessoas incríveis, pessoas com quem mantenho amizades próximas, sendo assim a estas pessoas agradeço a companhia.

Ao longo destes anos, a minha vertente artística foi muito explorada, quero agradecer a quem conheci na Faculdade, que me permitiu dar os meus primeiros passos na música. Quero ainda deixar aqui uma palavra de apreço às amizades que a arte me presentiou, não apenas em contexto universitário, refiro-me às ligações que criei nos últimos anos graças à música.

Quero ainda ressaltar uma fase final do meu percurso, o meu semestre de ERASMUS, onde vivi na Estónia durante cinco meses. Durante esta fase aprendi o que era viver sozinho, nunca tinha acontecido. Toda essa independência foi crucial para a minha formação como indivíduo. Além disto, o ERASMUS permitiu-me aproveitar a vida estudantil como nunca me tinha sido possível, tendo conhecido vários países, várias realidades e aprendido muito academicamente num ensino diferente e em áreas diferentes da Engenharia. Mais que tudo, deu-me o privilégio de ter vivido inúmeras madrugadas a dentro, fazendo amizades com todos os cantos da Europa, aproveitando a efemeridade da juventude. Tendo em conta tudo o que aqui disse, quero agradecer a todas as ligações que a Estónia me proporcionou, em especial as amizades que ainda hoje mantenho proximamente distantes, *aitäh*.

Deixando um voto final de agradecimento aos meus amigos de longa data, amizades que tenho comigo desde a adolescência, algumas desde criança, companheiros de vida com quem posso contar e que foram importantes em alguma etapa da minha existência, ou que ainda o são, fazendo-me ser maior do que eu a cada dia que passa.

O último pensamento deste texto é de nostalgia, entrando agora numa fase diferente da minha vida, estando empolgado, porém sempre pensativo como me caracteriza. Não há grande conclusão a este texto, não há como resumir os anos de Faculdade de alguma forma, basta-me agradecer a quem deles fez parte.

*“ Da minha aldeia vejo quanto da terra se pode ver do Universo...
Por isso a minha aldeia é tão grande como outra terra qualquer,
Porque eu sou do tamanho do que vejo
E não do tamanho da minha altura...”*

Fernando Pessoa

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação, Objetivos e Contribuição	3
1.3	Apresentação da Empresa	4
1.4	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas	5
1.5	Estrutura da Dissertação	7
1.6	Material Utilizado	8
2	Revisão Bibliográfica	9
2.1	Funcionalidades do Sistema SCADA	9
2.2	Os Níveis de Automação	10
2.3	Modelo <i>Open Systems Interconnection</i>	12
2.4	Evolução do Sistema SCADA	14
2.5	Componentes do Sistema SCADA	17
2.6	Arquitetura de Comunicações do Sistema SCADA	21
2.6.1	Arquitetura e Topologia de Rede	21
2.6.2	Protocolos de Comunicação	24
3	Sistema SCADA aplicado a Centrais Fotovoltaicas	27
3.1	Classificação da Central Fotovoltaica	27
3.2	Componentes da Central Fotovoltaica	30
3.3	Comunicações ativas da Central Fotovoltaica	43
4	Exigências do Sistema SCADA aplicado a Centrais Fotovoltaicas	51
4.1	Requisitos Funcionais do Sistema SCADA	51
4.2	Requisitos não Funcionais do Sistema SCADA	64
5	Otimizações aplicáveis ao Sistema SCADA	69
5.1	Avanços Tecnológicos aplicados ao Sistema SCADA	69
5.2	Quarta Geração do Sistema SCADA	74
5.2.1	Arquitetura da Quarta Geração do Sistema SCADA	74
5.2.2	Segurança Avançada aplicada ao Sistema SCADA	75
5.2.3	Comunicação Avançada aplicada ao Sistema SCADA	77
6	Conclusões e Perspetivas Futuras	79
	Referências	81
A	Esquema Unifilar de uma Central Fotovoltaica Genérica	88
B	Arquitetura de Comunicações de uma Central Fotovoltaica Genérica	90

Lista de Figuras

Figura 1.1	Central fotovoltaica a partir de um drone.	2
Figura 1.2	Sala de controlo aplicada ao sistema SCADA.	3
Figura 1.3	Logótipo da Jayme da Costa.	3
Figura 1.4	Instalações da Jayme da Costa no Porto.	5
Figura 2.1	Representação da pirâmide de automação.	10
Figura 2.2	Representação do modelo OSI.	12
Figura 2.3	Arquitetura do sistema SCADA centralizado.	15
Figura 2.4	Arquitetura do sistema SCADA distribuído.	16
Figura 2.5	Arquitetura do sistema SCADA em rede.	17
Figura 2.6	Representação do sistema SCADA.	18
Figura 2.7	Representação da hierarquia de comunicação <i>Client-Server</i>	25
Figura 2.8	Comparação entre os padrões de comunicação <i>Request-Response</i> e <i>Publish-Subscribe</i>	26
Figura 3.1	Projeto de baterias na central fotovoltaica de Alcoutim.	29
Figura 3.2	Central híbrida desenvolvida pela EDP Renováveis.	30
Figura 3.3	Visão simplificada da central solar fotovoltaica.	30
Figura 3.4	Posto de transformação desenvolvido pela Jayme da Costa.	31
Figura 3.5	Subestação elétrica desenvolvida pela Jayme da Costa.	31
Figura 3.6	Configurações a partir de células fotovoltaicas.	32
Figura 3.7	Comparação entre painéis solares monocristalinos e policristalinos.	33
Figura 3.8	Instalação de módulos solares equipados com <i>trackers</i> numa central fotovoltaica.	34
Figura 3.9	Inversor descentralizado presente numa central fotovoltaica.	36
Figura 3.10	Disjuntores do QPI presente numa central fotovoltaica.	37
Figura 3.11	Estação meteorológica montada numa central fotovoltaica.	39
Figura 3.12	Piranómetro montado numa central fotovoltaica.	39
Figura 3.13	PLC montado numa central fotovoltaica.	40
Figura 3.14	Contador de energia montado numa central fotovoltaica.	41
Figura 3.15	Vistas de um relé de interligação montado numa central fotovoltaica.	42
Figura 3.16	Simplificação das comunicações do sistema SCADA na central solar fotovoltaica.	43
Figura 4.1	<i>Layout</i> geográfico da central fotovoltaica de Tondela.	55
Figura 4.2	Vista geral da central fotovoltaica de Tondela.	56
Figura 4.3	Produção no mês de julho da central fotovoltaica de Serpa.	57
Figura 4.4	Produção no ano de 2024 da central fotovoltaica de Serpa.	58
Figura 4.5	Página de geração de gráficos da interface SCADA.	59
Figura 4.6	Gráfico em tempo real com diversos dados em relação à central fotovoltaica de Tondela.	59
Figura 4.7	Controlo do circuito elétrico em tempo real da central fotovoltaica de Fontainhas.	60
Figura 4.8	Controlo de <i>trackers</i> em tempo real da central fotovoltaica de Fontainhas.	61
Figura 4.9	Controlo de um <i>tracker</i> individual em tempo real da central fotovoltaica de Fontainhas.	61

Figura 4.10	Controlo do PPC em tempo real da central fotovoltaica de Tondela.	62
Figura 4.11	Lista de alarmes e eventos da central fotovoltaica de Tondela.	63
Figura 4.12	Lista de alarmes ativos da central fotovoltaica de Tondela.	63
Figura 4.13	Esquema representativo do funcionamento da <i>firewall</i>	66
Figura 4.14	Esquema representativo do funcionamento da rede VPN.	67
Figura 4.15	Esquema representativo do funcionamento do sistema IDS.	68
Figura 4.16	Esquema representativo do funcionamento do sistema IPS.	68
Figura 5.1	Representação gráfica da interligação entre IoT e a rede <i>cloud</i>	70
Figura 5.2	Arquitetura do sistema IoT SCADA.	75
Figura 5.3	Esquema representativo do protocolo de comunicação OPC UA.	78

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas relacionados à dissertação.	6
Tabela 2.1	Componentes e funcionalidades de um sistema SCADA.	20
Tabela 2.2	Dispositivos de comunicação num sistema SCADA.	21
Tabela 3.1	Classificação e caracterização das centrais fotovoltaicas.	27
Tabela 3.2	Dispositivos típicos de uma estação meteorológica.	38
Tabela 3.3	Resumo das arquiteturas de rede em sistemas SCADA.	44
Tabela 3.4	Requisitos operacionais do servidor SCADA.	50
Tabela 3.5	Requisitos operacionais dos controladores.	50
Tabela 4.1	Indicadores de performance típicos numa central fotovoltaica.	52
Tabela 4.2	Indicadores de estado típicos de uma central fotovoltaica.	55
Tabela 5.1	Resumo das características dos tipos de redes <i>cloud</i>	71
Tabela 5.2	Resumo dos modelos de serviço em <i>cloud computing</i>	72
Tabela 5.3	Resumo dos tipos de aprendizagem em <i>machine learning</i>	73
Tabela 5.4	Resumo das dimensões do <i>big data</i>	74

Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas

AI	<i>Artificial Intelligence</i>
AT	Alta Tensão
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSF	Central Solar Fotovoltaica
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DoS	<i>Denial of Service</i>
DDoS	<i>Distributed Denial of Service</i>
DLMS	<i>Device Language Message Specification</i>
DNP3	<i>Distributed Network Protocol 3</i>
EDP	Energias de Portugal
EMS	<i>Energy Management System</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
IaaS	<i>Infrastructure as a Service</i>
IDS	<i>Intrusion Detection System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPS	<i>Intrusion Prevention System</i>
JdC	Jayme da Costa
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MAT	Muito Alta Tensão
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MT	Média Tensão
MTU	<i>Master Terminal Unit</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas

OPC	<i>Open Platform Communications</i>
OPC UA	<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>
P2P	<i>Peer to Peer</i>
PaaS	<i>Platform as a Service</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
POA	<i>Plane of Array</i>
PR	<i>Performance Ratio</i>
PT	Posto de Transformação
QPI	Quadro de Proteção dos Inversores
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SaaS	<i>Software as a Service</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo
UPP	Unidade de Pequena Produção
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

Unidades de Medida

MW	Unidade de Potência (megawatt)
kW	Unidade de Potência (kilowatt)
m ²	Unidade de Área (metro quadrado)
h	Unidade de Tempo (hora)
kWh	Unidade de Energia (kilowatt-hora)
W/m ²	Unidade de Irradiância (watt por metro quadrado)

Símbolos

PR	<i>Performance Ratio (%)</i>
$E_{\text{total real}}$	Energia esperada de ser produzida pela central (kWh)
$E_{\text{total teórica}}$	Energia produzida pela central (kWh)
P_i	Potência no inversor i (kW)
$P_{\text{total teórica}}$	Potência esperada de ser produzida pela central (kW)
t_0	Tempo inicial (h)
t	Tempo final (h)
$t_{\text{operação}}$	Tempo de operação da central (h)
t_{total}	Tempo total (h)
D	Disponibilidade da central (%)

Capítulo 1

Introdução

Este primeiro Capítulo tem o intuito de introduzir a dissertação, contextualizando o tema e a sua relevância. Além disso, abordam-se os objetivos do trabalho, a motivação que impulsionou a realização deste estudo e a contribuição do trabalho para a empresa. De seguida, apresenta-se a empresa onde o trabalho foi desenvolvido e enquadra-se o mesmo nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. Finalmente, descreve-se a estrutura da dissertação e o material utilizado para a sua concretização.

1.1 Contextualização

A energia é um recurso indispensável para a humanidade e um requisito primário da economia moderna. De forma muitas vezes irracional, os combustíveis fósseis foram utilizados ao longo dos anos, o que provocou danos significativos ao planeta, como as emissões de dióxido de carbono e outros gases de efeito de estufa. Estes contribuem para a poluição e, mais grave ainda, para o aquecimento global e para as alterações climáticas que enfrentamos atualmente [1, 2]. Nos dias de hoje, os combustíveis fósseis continuam a ser uma das principais fontes de energia a nível global. No entanto, a transição energética é uma realidade em curso. A Organização das Nações Unidas (ONU) traçou metas para 2030 que visam combater diversos problemas ambientais.

Paralelamente, a União Europeia estabeleceu também, até 2030, a meta de que 80% da energia produzida internamente seja proveniente de fontes renováveis. Para alcançar este objetivo, Portugal criou o Plano Nacional de Energia e Clima para 2030 (PNEC 2030), aprovado a 10 de julho de 2020 [3].

Este plano mantém uma perspetiva otimista em relação à meta, embora tenha sido revisto mais recentemente. A última atualização do PNEC 2030 foi aprovada a 30 de outubro de 2024 [4], antecipando a meta de 80% para 2026, garantindo que, a partir desse ano, 80% da energia produzida em território nacional seja de origem renovável [5].

A produção sustentável de energia é extremamente relevante para combater estas questões e é uma prioridade para Portugal e para o mundo, em especial a produção através da energia solar. Quando se fala de geração energética através de fontes de energia renováveis, a adequação da energia solar ao ambiente, o seu custo reduzido a longo prazo e a sua versatilidade são algumas das vantagens significativas desta fonte de energia, que têm chamado a atenção nos esforços para substituir os combustíveis fósseis [2, 6]. Porém, a abundância de radiação solar é o fator chave que possibilita a geração de energia fotovoltaica, mesmo em países com menor incidência solar.

O PNEC 2030 foi ajustado com base nesses avanços, sendo que a última revisão estabeleceu que, até 2030, 90% da eletricidade produzida no sistema electroprodutor português seja de origem renovável, com 39% proveniente de energia solar [7]. Além disso, a quota de energias renováveis no consumo final bruto nacional deverá atingir 51%, quatro pontos percentuais acima da meta anterior [8].

Estes fatores posicionam a energia solar como uma prioridade estratégica, tanto na exploração de novas tecnologias quanto no investimento na sua produção. Graças ao apoio governamental, por meio de subsídios e incentivos, houve grandes avanços na geração de energia solar. A produção de células fotovoltaicas aumentou consideravelmente, o que resultou na redução dos seus custos e no aumento substancial da sua eficiência [9]. A Figura 1.1 mostra a vista a partir de um drone, de uma central fotovoltaica desenvolvida pela Jayme da Costa.

Este progresso não se deve apenas ao aumento da infraestrutura de produção de energia, mas também à melhoria da eficiência das infraestruturas existentes e à maior consciencialização sobre o uso e a exploração dos recursos. Diante disso, surge a necessidade de introduzir o conceito de sistemas de supervisão, monitorização e controlo, com o propósito de gerir e acompanhar processos complexos, garantindo um maior desempenho operacional, bem como segurança e fiabilidade.

Estes sistemas, também conhecidos como sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition*, ou SCADA, são estritamente necessários e relevantes para gerir eventos espontâneos devido à capacidade de aquisição de dados em tempo real, possibilitando a tomada de decisões com rapidez.

Um sistema SCADA é, também, responsável por disponibilizar ao operador uma forma de processar e analisar dados sobre os processos que estão a ser executados. Ao mesmo tempo, permite supervisionar e atuar sobre os mesmos processos de forma a resolver situações indesejadas ou ajustar parâmetros críticos [10, 11]. Na Figura 1.2 está representada uma sala de controlo, presente numa central fotovoltaica sob a responsabilidade da Jayme da Costa, utilizada como exemplo para a análise, monitorização e controlo do sistema SCADA.



Figura 1.1: Central fotovoltaica a partir de um drone.

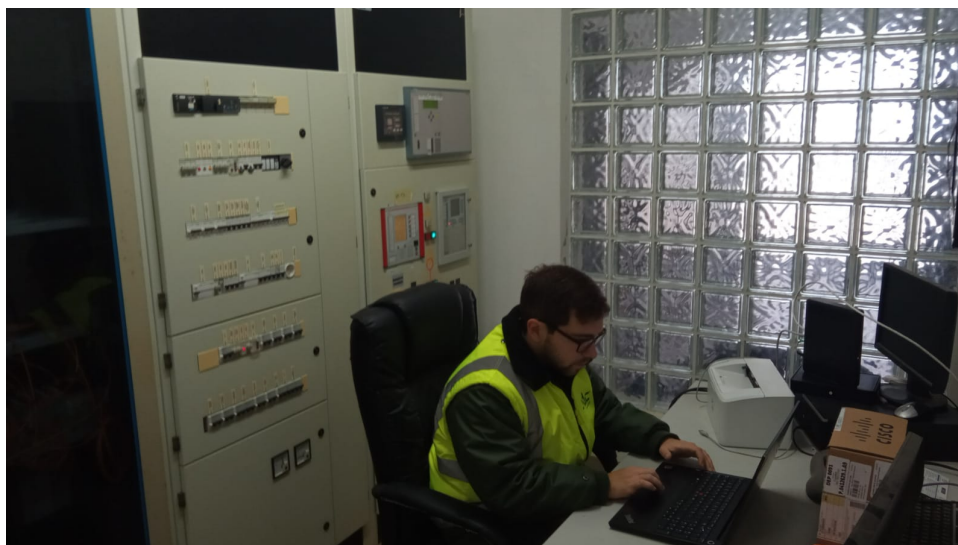


Figura 1.2: Sala de controlo aplicada ao sistema SCADA.

Em sistemas fotovoltaicos, a implementação de um sistema SCADA reveste-se de extrema importância, uma vez que possibilita a monitorização contínua de diversos parâmetros, como a produção de energia, o estado de componentes críticos e as condições meteorológicas. Através deste sistema, é possível identificar falhas ou perdas de desempenho, contribuindo assim para uma gestão mais eficiente da produção e para a otimização da rentabilidade do sistema. Uma central fotovoltaica integrada com um sistema SCADA torna-se capaz de responder de forma mais eficaz às exigências operacionais, permitindo que as decisões tomadas, em consonância com as dinâmicas do mercado energético, sejam mais informadas e estratégicas, promovendo uma distribuição da energia mais eficiente e alinhada com as necessidades do setor elétrico.

1.2 Motivação, Objetivos e Contribuição

Este trabalho foi desenvolvido em parceria entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [12] e a Jayme da Costa [13], com o propósito de atender à necessidade apresentada pela empresa de melhorar os sistemas de supervisão, monitorização e controlo dos parques fotovoltaicos sob a sua administração. O logótipo atual da Jayme da Costa encontra-se na Figura 1.3.



Figura 1.3: Logótipo da Jayme da Costa.

A constante evolução do setor energético exige sistemas de monitorização e controlo mais eficazes, uma prioridade para a Jayme da Costa. Como tal, o objetivo deste trabalho foi elaborar uma documentação técnica para especificar o sistema de supervisão, monitorização e controlo aplicado a centrais fotovoltaicas, tendo em conta diferentes configurações.

Esta especificação técnica descreve as componentes do sistema SCADA, detalhando a sua integração e interligação na central fotovoltaica. Além disso, aborda os requisitos funcionais e não funcionais do sistema, com foco na definição das funcionalidades necessárias para uma gestão eficiente e segura dos parques fotovoltaicos.

A contribuição para a empresa com este trabalho foi capacitar a Jayme da Costa com uma forma de orientar o desenvolvimento e a implementação de sistemas SCADA para diversas configurações de centrais fotovoltaicas, garantindo flexibilidade, padronização e eficiência no processo, com um acesso eficaz a toda a informação necessária no mesmo documento. Simultaneamente, esta documentação possibilitou um melhor enquadramento das temáticas abordadas para membros da empresa sem formação específica na área, promovendo a aprendizagem contínua dentro da JdC.

1.3 Apresentação da Empresa

A Jayme da Costa destaca-se como uma das empresas com mais de um século de história em Portugal, tendo sido fundada em 1916 por Artur Augusto dos Santos, Joaquim Mendes da Costa e Artur Martins Nogueira, sob a designação inicial de “Santos, Costa & Nogueira, Lda.”. No mesmo ano, Jayme da Costa integrou a sociedade, desempenhando um papel decisivo no seu desenvolvimento, o que levou à alteração da denominação social para “Jayme da Costa, Limitada”.

A empresa iniciou a sua atividade em Lisboa, focando-se na produção e comercialização de equipamentos elétricos de baixa e média tensão. Na época, a empresa destacou-se rapidamente pela qualidade dos seus produtos e pela inovação nas soluções técnicas, tornando-se um dos principais agentes no processo de eletrificação de Portugal.

Até à independência das ex-colónias, a JdC manteve instalações fabris em Angola e Moçambique, com significativa atuação nesses mercados. Após a Revolução de 1974, apesar da instabilidade político-social e da crise económica que afetava o país, a empresa continuou a ser um dos principais fornecedores de energia elétrica, colaborando estreitamente com as entidades que mais tarde se agregariam na atual Energias de Portugal (EDP).

Contudo, a crise económica da década de 1980 obrigou a empresa a enfrentar desafios consideráveis, resultando numa reestruturação profunda, que permitiu a recuperação e o relançamento da atividade. Em 1989, a JdC transferiu as suas instalações para Grijó, sendo que, na Figura 1.4, está presente a fachada da empresa, na sua atual sede.

Já com sede no Porto, a Jayme da Costa iniciou o seu processo de modernização, alinhando-se com normas internacionais e obtendo as certificações de qualidade EN NP ISO 9002 e, posteriormente, ISO 9001 e ISO 14001.



Figura 1.4: Instalações da Jayme da Costa no Porto.

A partir dessa reorganização, a empresa expandiu-se significativamente, com forte aposta na prestação de serviços e no setor das energias renováveis, assim como na internacionalização, especialmente em Angola e França. Em 2020, houve uma reestruturação acionista, com a entrada da *Core Capital* e da Visabeira Global, o que permitiu reforçar o potencial de crescimento da empresa [13].

Em 2023, a JdC juntou-se integralmente à Visabeira Global, ganhando uma maior robustez financeira e operacional através do envolvimento num grupo socioeconómico multinacional e multissetorial. Atualmente, a Jayme da Costa posiciona-se como um dos principais intervenientes na área das energias renováveis e na distribuição de energia em Portugal, estando envolvida em diversos parques fotovoltaicos espalhados pelo país e, ao mesmo tempo, na área dos transportes, estando a trabalhar na expansão da linha amarela e na criação da linha rosa e da linha rubi do Metro do Porto.

1.4 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas estão incluídos na Agenda 2030, uma agenda global destinada a promover um futuro mais sustentável e inclusivo. Em 2015, os 193 Estados membros da Organização das Nações Unidas (ONU) adotaram como parte integrante da Agenda 2030 um plano de ação abrangente que visa erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir condições de vida dignas e pacíficas para toda a população [14].

No âmbito desta agenda, foram definidos 17 objetivos a serem alcançados até 2030. Estes objetivos representam as principais prioridades e desafios globais, mobilizando esforços coletivos para enfrentar questões críticas como as alterações climáticas, a desigualdade social, o acesso universal à energia e a preservação dos ecossistemas [14].

Esta dissertação alinha-se com vários dos princípios estabelecidos pelos ODS, abordando de forma direta temas relacionados com a transição energética e a sustentabilidade. Em particular, são analisados aspetos fundamentais como a eficiência no controlo e monitorização de centrais fotovoltaicas, os quais contribuem para o alcance de metas associadas à acessibilidade de energia limpa (ODS 7), à inovação na indústria (ODS 9) e à sustentabilidade no consumo e produção (ODS 12). Na Tabela 1.1, estão detalhados os ODS relevantes para esta dissertação, incluindo as metas e indicadores específicos.

Em relação ao ODS 7, esta dissertação está alinhada com a meta 7.3, que visa duplicar a taxa global de melhoria da eficiência energética até 2030. A especificação técnica de um sistema SCADA contribui para esta meta ao fornecer uma base sólida de informações e orientações que permitem uma operação eficiente das centrais fotovoltaicas.

Essa eficiência pode ser alcançada ao maximizar a performance das componentes da central fotovoltaica, alinhando-se com o indicador 7.3.1, que mede a intensidade energética em termos de energia primária e PIB. Assim, estando a dissertação associada à geração de energia renovável e a sistemas que otimizam a produção energética, está diretamente ligada a este objetivo.

Quanto ao ODS 9, esta dissertação enquadra-se com a meta 9.4, que visa modernizar infraestruturas e reconverter indústrias para torná-las mais sustentáveis, com maior eficiência no uso de recursos e adoção de tecnologias limpas e ambientalmente corretas. A documentação do sistema SCADA contribui para a modernização da infraestrutura de produção de energia solar ao fornecer uma descrição clara e acessível dos processos e tecnologias envolvidos no funcionamento das centrais fotovoltaicas.

Esta dissertação permite beneficiar de um maior entendimento das centrais existentes, promovendo a eficiência operacional e a adoção de práticas mais sustentáveis. Isso está em consonância com o indicador 9.4.1, que mede a emissão de CO₂ por unidade de valor agregado, ao possibilitar a operação de sistemas com menores impactos ambientais. Mantendo a eficiência no controlo e supervisão da central fotovoltaica, é possível tornar a produção energética mais completa e aumentar o seu rendimento, tendo assim mais energia produzida.

Tabela 1.1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas relacionados à dissertação.

Objetivo	Meta	Indicador
7 - Energias Renováveis e Acessíveis	7.3 - Até 2030, duplicar a taxa global de melhoria da eficiência energética.	7.3.1 - Intensidade energética medida em termos de energia primária e produto interno bruto (PIB).
9 - Indústria, Inovação e Infraestruturas	9.4 - Até 2030, modernizar infraestruturas e reconverter indústrias para torná-las sustentáveis, com maior eficiência no uso de recursos e adoção de tecnologias limpas e ambientalmente corretas.	9.4.1 - Emissão carbónica por unidade de valor acrescentado.
12 - Produção e Consumo Sustentáveis	12.2 - Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.	12.2.1 - Pegada material, pegada material <i>per capita</i> e pegada material em relação ao PIB.

Em relação ao ODS 12, esta dissertação contribui para a meta 12.2, que busca alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais. A documentação do sistema SCADA permite um uso mais eficiente dos recursos ao fornecer aos operadores informações precisas sobre o desempenho dos sistemas, permitindo-lhes tomar decisões informadas para melhorar a gestão da produção de energia solar.

Embora a dissertação não aborde a implementação prática do sistema, a documentação detalha práticas operacionais que, quando seguidas, garantem a utilização eficiente dos recursos disponíveis, alinhando-se com o indicador 12.2.1, relacionado à pegada material.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação inicia com a sua introdução, sendo neste Capítulo 1 apresentada uma contextualização ao trabalho realizado, onde são descritos os objetivos da dissertação, a motivação e relevância da investigação e uma apresentação da empresa onde a dissertação foi desenvolvida. Este Capítulo inclui também uma análise dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas relacionados com o tema e a descrição do material utilizado para a sua elaboração.

De seguida, o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, na qual é realizado um mapeamento das áreas de interesse para o trabalho, com um enquadramento detalhado no estado da arte em ciência e tecnologia. Este Capítulo fornece as bases teóricas necessárias para compreender os temas abordados ao longo do documento.

Neste Capítulo, é também feita uma visão geral do sistema SCADA, destacando as suas principais componentes, essenciais para o funcionamento eficiente do sistema. De seguida, é apresentada a arquitetura de comunicações do sistema SCADA, englobando a arquitetura e topologia da rede, assim como as estruturas base dos protocolos de comunicação.

Já o Capítulo 3 aborda o sistema SCADA aplicado no contexto específico da produção fotovoltaica. Neste Capítulo, são descritas as características de uma central fotovoltaica, incluindo as suas particularidades e o respetivo funcionamento. Para além disso, são apresentadas as componentes essenciais e as necessidades de comunicação das mesmas, de forma a permitir uma integração eficiente com o sistema SCADA.

Posteriormente, o Capítulo 4 aprofunda as exigências de um sistema SCADA aplicado a centrais fotovoltaicas, incluindo requisitos funcionais e não funcionais. Neste Capítulo, é feita uma descrição das funcionalidades e necessidades do sistema SCADA.

No Capítulo 5, são discutidas possíveis melhorias aplicáveis a sistemas SCADA, tendo em conta o contexto da produção fotovoltaica. Este Capítulo explora tópicos como a integração do sistema SCADA com a *cloud*, a migração para o uso de tecnologias de comunicação mais modernas e a implementação de segurança avançada.

Por fim, no Capítulo 6 são discutidas as conclusões do trabalho realizado, analisando os principais contributos da dissertação no que diz respeito à estratégia da Jayme da Costa para projetos futuros e para abordagens modernas. Ao mesmo tempo, é feita uma reflexão sobre o trabalho realizado, os objetivos alcançados e perspectivas futuras.

É importante salientar que, de forma a facilitar a leitura e a consulta do documento, a notação, simbologia e abreviaturas utilizadas ao longo do texto são as que, cientificamente, são mais aceites. As Equações, Tabelas e Figuras são numeradas relativamente ao Capítulo em que se encontram. Por exemplo, a Figura (x.y) indica que x se refere ao número do Capítulo, e y à ordem sequencial da Figura dentro do mesmo Capítulo. Esta lógica aplica-se igualmente às Equações e Tabelas, sendo a numeração reiniciada no início de um novo Capítulo. As referências são organizadas de forma sequencial no formato [x].

1.6 Material Utilizado

Esta dissertação, por se tratar de uma documentação técnica, não exigiu trabalho experimental nem a utilização de laboratórios ou equipamentos físicos. A sua elaboração baseou-se essencialmente em pesquisa bibliográfica, análise documental e levantamento de requisitos técnicos para os tópicos relevantes nesta investigação. Este processo foi complementado pela visita técnica a uma central fotovoltaica, a encargo da Jayme da Costa, realizada em conjunto com colaboradores da empresa, permitindo um aprofundamento prático dos processos associados à geração de energia fotovoltaica.

Para o sucesso desta dissertação, foram utilizados artigos académicos, normas técnicas e referências bibliográficas disponíveis em bases de dados científicas, bem como documentação pública. De particular relevância foi o acesso a documentação privada da Jayme da Costa, a qual incluiu relatórios técnicos, especificações de projetos realizados pela empresa e outros documentos que detalham a sua ação em diferentes contextos. Estes documentos foram fundamentais para a compreensão de conceitos específicos e para a redação de partes técnicas da dissertação. Contudo, devido ao seu caráter confidencial, não podem ser referenciados ou divulgados neste trabalho. Estas fontes complementaram a análise e serviram de suporte para a elaboração desta dissertação.

Durante a realização da dissertação, não houve qualquer tipo de custo relacionado com *software*, quer para a FEUP, quer para a Jayme da Costa, não havendo necessidade de investimentos adicionais. Todos os recursos utilizados consistiram em ferramentas de acesso gratuito ou disponibilizadas pela Jayme da Costa, sem necessidade de investimentos adicionais neste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo, é realizado um mapeamento das áreas essenciais para a compreensão dos sistemas de supervisão, monitorização e controlo em contexto industrial, abordando as suas funcionalidades e a necessidade da sua implementação em diversos setores. De seguida, é apresentado o posicionamento do sistema SCADA na hierarquia de um processo industrial, explicando como este se integra com outros sistemas e como interage com as diferentes camadas de automação. Além disso, é abordado o modelo OSI, de forma a compreender como é feita a comunicação eficaz entre os dispositivos no sistema SCADA.

De seguida, é feita uma visão geral do sistema SCADA, discutindo a sua evolução ao longo dos anos e detalhando as suas componentes principais, bem como a forma como estas se interligam, analisando a arquitetura de comunicações tendo em conta a tipologia de rede e o funcionamento dos protocolos de comunicação mais relevantes.

2.1 Funcionalidades do Sistema SCADA

Os sistemas de supervisão, controlo e aquisição de dados são indispensáveis na indústria atualmente, sendo que, sem a sua existência, muitos processos tornar-se-iam extremamente mais demorados e menos eficientes [10].

Um sistema SCADA integra *hardware* e *software* com o objetivo de monitorizar e controlar processos industriais em tempo real. Este tipo de sistema é amplamente utilizado em diversas áreas, como o tratamento de água, petróleo e gás, a produção têxtil e o setor de transportes e logística, além de ser fundamental na geração e distribuição de energia [15].

Mais concretamente, o SCADA é dividido em três principais âmbitos de função, sendo estas funções de monitorização, de supervisão e de controlo [11]. Posto isto, dentro das principais funcionalidades do sistema SCADA em contexto industrial, podemos focar nas seguintes:

- **Supervisionar e visualizar processos em tempo real**

Permite obter uma visão detalhada do estado das ações, das condições dos equipamentos e das variáveis do processo industrial, através de uma interface gráfica.

- **Controlar processos industriais e infraestruturas localmente ou remotamente**

Permite a automação de processos e o envio de comandos para dispositivos de campo, seja em instalações locais ou em sistemas distribuídos geograficamente.

- **Monitorizar, recolher e processar dados em tempo real**

Regista continuamente dados de sensores e controladores, criando um histórico para análises futuras e possibilitando ajustes automáticos nos processos.

- **Detetar alarmes e eventos**

Identifica automaticamente falhas ou anomalias, notificando os operadores através de alarmes via *e-mail*, a partir da interface própria, ou até por mensagem de telemóvel, permitindo uma resposta rápida ao problema.

- **Realizar cálculos automáticos e operações lógicas**

Efetua cálculos regulares para ajustar o controlo de processos, como ajustes de parâmetros, e executa operações lógicas programadas nos controladores.

- **Gerar relatórios e análises de desempenho**

Compila e apresenta dados históricos e em tempo real, de forma a auxiliar decisões futuras. Fornece análises de eficiência e desempenho, ao mesmo tempo que identifica padrões.

2.2 Os Níveis de Automação

Para compreender a integração do sistema SCADA no funcionamento de um processo industrial, é fundamental entender a pirâmide de automação e os respetivos níveis, sendo que esta abordagem permite esquematizar de forma eficaz os processos industriais. A Figura 2.1 [16] apresenta a pirâmide de automação, com os cinco níveis de automação claramente definidos.

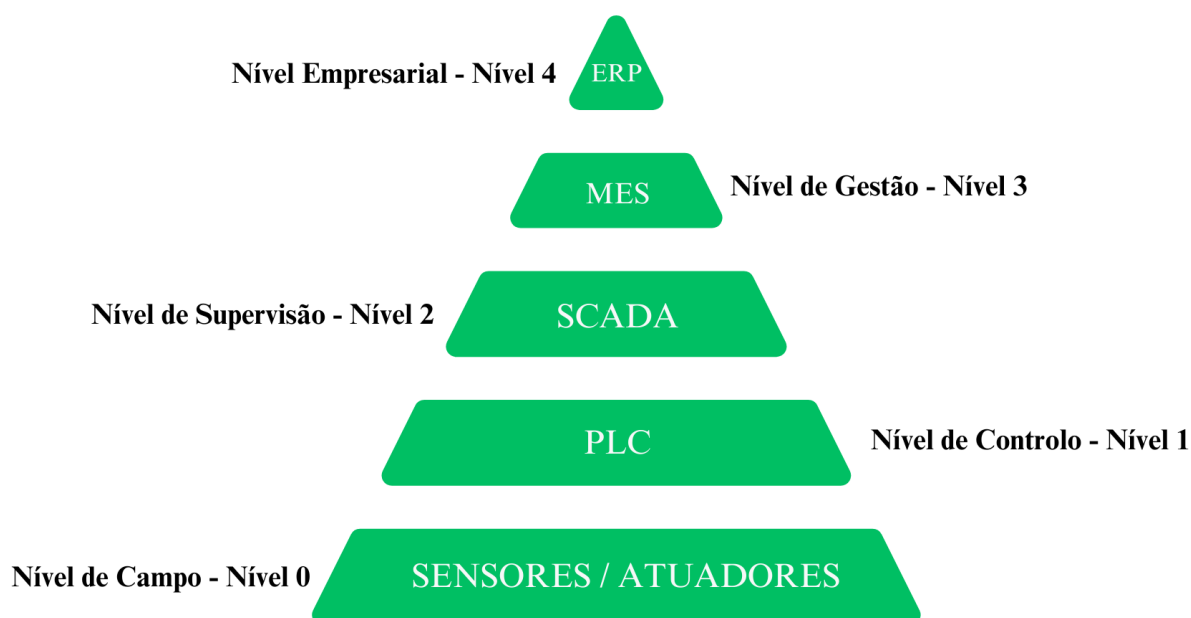


Figura 2.1: Representação da pirâmide de automação.

- **Nível 0 - Nível de Campo**

O nível de campo é o primeiro nível da pirâmide de automação, sendo que nele estão incluídos os sensores, os atuadores e as componentes de comunicação, como *routers*, *switches* ou repetidores de sinal. O objetivo deste nível é representar todos os dispositivos físicos do processo industrial, incluindo componentes que monitorizam valores, como um contador, e também elementos que realizam alguma função física, como um motor elétrico [16].

- **Nível 1 - Nível de Controle**

No nível de controle encontram-se as componentes responsáveis por armazenar as informações recolhidas no nível de campo e por controlar os dispositivos desse nível. Este nível é indispensável para o funcionamento do nível de campo, uma vez que garante a supervisão e a coordenação das suas operações. Um dos elementos principais deste nível é o *Programmable Logic Controller* (PLC), que tem como função recolher os dados provenientes dos dispositivos de campo e tomar decisões baseadas em instruções previamente programadas, permitindo a execução das tarefas definidas [17].

- **Nível 2 - Nível de Supervisão**

O nível de supervisão, onde se insere o sistema SCADA, é capaz de adquirir toda a informação dos níveis abaixo e tem a função de os controlar, monitorizar e supervisionar. Os dados recolhidos pelos dispositivos do nível 0 são analisados pelos controladores do nível 1 e enviados para os sistemas SCADA do nível 2, onde são interpretados e os comandos enviados de volta para os controladores e, consequentemente, para os dispositivos de campo [15].

- **Nível 3 - Nível de Gestão**

O nível de gestão existe para monitorizar todo o processo industrial de início ao fim. Este nível exige um *Management Execution System* (MES), que rastreia e documenta todas as etapas do processo, ajudando a gerir e compreender melhor as ações tomadas. Este sistema proporciona vantagens como a redução de custos e um maior controlo de qualidade [18].

- **Nível 4 - Nível Empresarial**

Por fim, o nível empresarial abrange todos os níveis anteriores e oferece uma supervisão e controlo a uma escala mais abrangente. Este nível não analisa apenas um processo, mas sim vários, e inclui também diversos departamentos de negócio.

O nível empresarial proporciona uma *big picture* de toda a atividade de uma empresa, utilizando um sistema de elevada complexidade associado a um *software* denominado *Enterprise Resource Planning* (ERP) [18].

Atualmente, com a evolução tecnológica, esta pirâmide de automação pode, por vezes, não ser tão hierárquica e rígida como a apresentada. Em algumas soluções industriais, existem, por exemplo, sensores que se controlam a si próprios, cobrindo tanto o nível de campo como o nível de controlo. Esta pirâmide tem como objetivo representar a generalidade dos casos e auxiliar na compreensão dos conceitos que envolvem o sistema SCADA.

2.3 Modelo *Open Systems Interconnection*

Ao abordar um sistema SCADA, é fundamental compreender como as suas componentes comunicam entre si. Para tal, é necessário distinguir os diferentes níveis de comunicação, desde o canal físico que liga os diversos elementos aos protocolos utilizados para conectar dois ou mais dispositivos.

O modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) surge como uma abordagem teórica capaz de organizar os diferentes níveis de comunicação e a sua hierarquia, descrevendo protocolos e serviços de rede de um modo mais intuitivo [19]. A partir deste modelo, é possível simplificar a resolução de problemas, identificando a origem de uma anomalia numa camada específica e direcionando os esforços para essa mesma camada [20].

A estrutura do modelo OSI é composta por sete camadas, cada uma com a sua função específica, que colaboram para a transmissão de dados entre dispositivos em rede e asseguram a interoperabilidade entre dispositivos e tecnologias de diferentes fornecedores. A Figura 2.2 [20] apresenta as sete camadas do modelo.

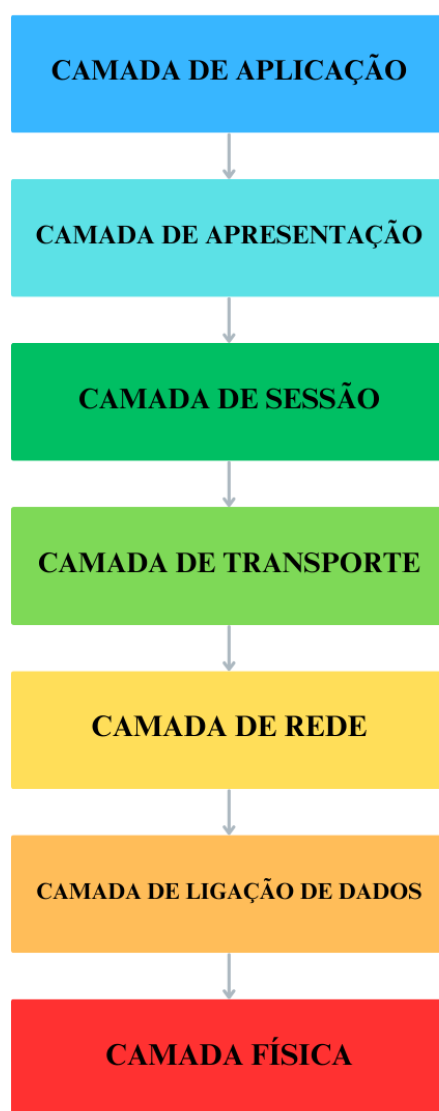


Figura 2.2: Representação do modelo OSI.

- **Camada Física**

A camada física é responsável pela criação do meio físico de comunicação entre os diversos dispositivos. Este meio pode ser um cabo de fibra ótica, um cabo de cobre compatível com *Ethernet* ou até uma conexão sem fios. A camada abrange ligações de comunicação feitas por sinais elétricos, óticos ou de radiofrequência.

Ao receber um sinal, esta camada converte-o em *bits*, enviando-os posteriormente para a camada de ligação de dados, que reconstituirá os dados num quadro, uma designação que se aplica a um conjunto de dados na segunda camada do modelo OSI. A camada física contém informações na forma de *bits* e é responsável pela transmissão desses *bits* individuais de um dispositivo para outro [21].

- **Camada de Ligação de Dados**

A camada de ligação de dados desempenha um papel crucial na criação e finalização de conexões entre nós fisicamente interligados, assegurando que a transferência de dados ocorra de forma eficiente e isenta de erros. Esta camada recebe dados da camada de rede, denominados pacotes, e procede à sua conversão em quadros para a transmissão via meio físico [19].

O protocolo mais comum nesta camada é o protocolo *Ethernet*, um conjunto de normas que regulam a organização dos dados em quadros na camada de ligação de dados. No entanto, a *Ethernet* pode também ser referida, de forma informal, como o canal físico (o cabo) que estabelece a interconexão entre dispositivos.

- **Camada de Rede**

A camada de rede tem duas funções principais. Primeiramente, realiza a segmentação das unidades de dados recebidas da camada de transporte em pacotes. Em seguida, é responsável pelo encaminhamento desses pacotes, assegurando a transmissão de dados entre dispositivos localizados em redes distintas, determinando o caminho mais eficiente através da rede física [21]. Para direcionar os pacotes até o nó de destino, esta camada utiliza endereços de rede [19], conhecidos como endereços *Internet Protocol* (IP).

Adicionalmente, a camada de rede estabelece um esquema de endereçamento que permite identificar de forma única cada dispositivo na rede, atribuindo um endereço IP a cada dispositivo, tanto para o remetente como para o destinatário [21].

- **Camada de Transporte**

A camada de transporte atua entre a camada de aplicação e a camada de rede, recebendo dados da primeira e enviando-os à segunda. Os dados nesta camada são chamados segmentos, e a sua principal função é garantir a entrega de mensagens completas do remetente ao destinatário. Esta camada também confirma a transmissão bem-sucedida dos dados e retransmite-os em caso de erro [21].

O protocolo mais relevante nesta camada é o *Transmission Control Protocol* (TCP), que garante a entrega confiável de dados, dividindo-os e assegurando que todos cheguem corretamente, sem erros e na ordem certa. Este protocolo é amplamente utilizado em aplicações que exigem uma transmissão de dados segura e ordenada, como navegadores de *Internet*, *e-mail* e transferência de ficheiros [19].

- **Camada de Sessão**

A camada de sessão estabelece canais de comunicação entre dispositivos, sendo responsável pela abertura, manutenção e encerramento dessas sessões [10].

Durante a transferência de dados, a camada de sessão pode definir pontos de sincronização. Estes pontos permitem que, em caso de interrupção, os dispositivos possam retomar a transferência a partir do último ponto de verificação, minimizando a perda de dados e evitando que as mensagens sejam cortadas prematuramente [19].

- **Camada de Apresentação**

A camada de apresentação prepara os dados para a camada de aplicação. Esta camada é responsável por definir a forma como dois dispositivos devem codificar, encriptar e comprimir os dados, assegurando que sejam recebidos corretamente do outro lado [20]. Ao mesmo tempo, processa os dados transmitidos pela camada de aplicação e prepara-os para a transmissão na camada de sessão [21].

- **Camada de Aplicação**

Por fim, a camada de aplicação é a interface pela qual os utilizadores interagem com o sistema. Ela disponibiliza os serviços necessários para que as aplicações acessem à rede, apresentando as informações ao utilizador de forma clara e intuitiva.

Sendo assim, o último nível do modelo atua como a ponte entre o utilizador e a funcionalidade oferecida pelos sistemas subjacentes. Através desta camada, aplicações direcionadas ao utilizador, como *websites*, navegadores de busca ou plataformas de comunicação, interagem com a rede, permitindo a troca de dados de forma transparente para o utilizador [20, 21].

2.4 Evolução do Sistema SCADA

Os sistemas de supervisão, controlo e aquisição de dados permitiram a automatização de diversos processos, impulsionando a evolução tecnológica da indústria. Atualmente, estes sistemas são essenciais para o funcionamento de qualquer grande infraestrutura.

Antigamente, os processos industriais exigiam a presença de funcionários para monitorizar e controlar as operações, antecipando falhas e agindo conforme necessário. Os operários estavam fisicamente no local e resolviam manualmente as situações, não existindo outra solução. Os sistemas SCADA foram desenvolvidos para resolver diversos problemas na indústria, começando a ser explorados a partir dos anos 50 do século passado. Estes sistemas passaram por várias fases até evoluírem para o estado atual [22, 23].

- **Primeira Geração - SCADA Centralizado**

As primeiras versões dos sistemas SCADA eram centralizadas, com uma capacidade de rede muito limitada (por vezes inexistente), caracterizando-se como sistemas isolados, sem interconexão.

Esses sistemas eram capazes de criar uma *Wide Area Network* (WAN) para comunicar com uma ou várias unidades de terminal remoto, ou *Remote Terminal Unit* (RTU), sendo que a sua única função era a troca de dados com o computador mestre, o servidor SCADA. A Figura 2.3 mostra uma simplificação da arquitetura do SCADA centralizado [24].

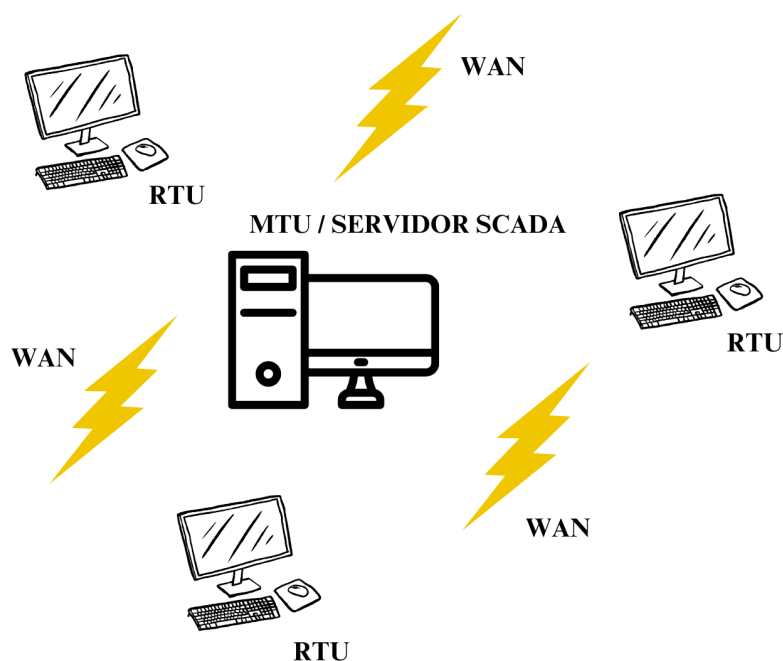


Figura 2.3: Arquitetura do sistema SCADA centralizado.

Nesta geração o modelo operava com o conceito de *Master-Slave*, onde existe uma componente central, designada como mestre, ou *Master Terminal Unit* (MTU), que exerce o controlo sobre as outras componentes do sistema. Estas componentes, denominadas escravas, ficam subordinadas à componente mestre, recebendo ordens e enviando informações conforme solicitado.

Este modelo define claramente as responsabilidades e a hierarquia de comunicação dentro do sistema, com a componente mestre a coordenar as operações e a gerir a troca de dados entre os dispositivos. A comunicação com as RTUs era feita exclusivamente através de protocolos proprietários, desenvolvidos pelos fornecedores, que eram compatíveis apenas com os computadores mestre do mesmo fabricante [25, 26].

A crescente demanda por melhorias nas comunicações levou à evolução dos sistemas SCADA, resultando na segunda geração, em que houve maior foco na melhoria das capacidades de conexão e comunicação entre dispositivos.

- **Segunda Geração - SCADA Distribuído**

Na segunda geração, o SCADA distribuído, foi introduzida a *Local Area Network* (LAN), uma rede local capaz de ligar múltiplos computadores no mesmo espaço físico, sendo que cada um representaria diferentes funções. Ao mesmo tempo, foi também introduzido o controlador PLC, capaz de controlar dispositivos de campo e oferecer funções de monitorização e supervisão.

Na Figura 2.4, é possível verificar uma arquitetura simplificada do SCADA distribuído [24], onde as estações de operação estão localmente conectadas a um servidor de comunicações que gere a ligação à rede WAN, onde se encontra o servidor SCADA.

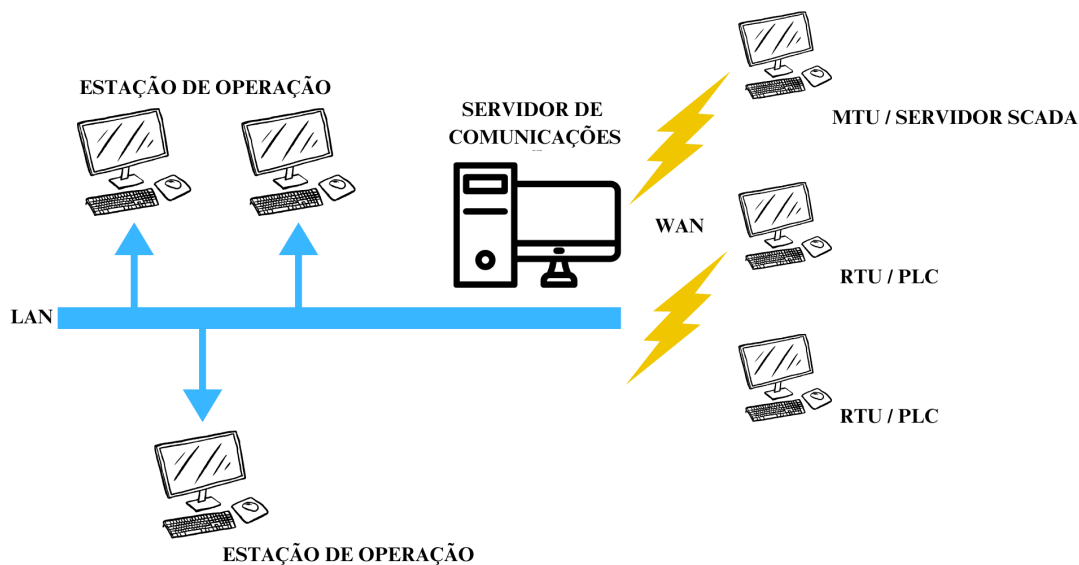


Figura 2.4: Arquitetura do sistema SCADA distribuído.

Neste SCADA distribuído, os sistemas eram capazes de comunicar entre si e, para além disso, seriam menores em tamanho e menos dispendiosos comparativamente à primeira geração de SCADA. A distribuição aumentou o poder de processamento, a fiabilidade e a redundância do sistema, mas não era capaz de ultrapassar os limites do ambiente local.

A conexão à rede num sistema SCADA distribuído era geralmente baseada em protocolos proprietários, em que, tal como na primeira geração, o fornecedor desenvolveria o seu próprio protocolo de rede, em vez de adotar protocolos já existentes, criando exclusividade.

• Terceira Geração - SCADA em Rede

A terceira geração de SCADA surgiu devido aos avanços na automação industrial e à disposição dos fornecedores em compreender e adaptar-se às necessidades do mercado. Denominada SCADA em rede, esta geração desvincula-se da dependência de componentes proprietárias dos fornecedores, apresentando uma arquitetura de sistema aberto que permite a utilização de protocolos e normas de comunicação abertos [22].

Esta abertura possibilita que as funcionalidades SCADA sejam distribuídas em redes WAN, em vez de se limitarem apenas a redes LAN fechadas. Adicionalmente, uma arquitetura aberta permite a utilização de dispositivos de terceiros, desbloqueando funcionalidades ainda maiores em comparação com a geração anterior [26]. Na Figura 2.5 está representada uma simplificação da arquitetura de um SCADA em rede [24], onde temos uma rede WAN conectada a um servidor de comunicações que gera a ligação com outras componentes externas à rede WAN.

Com a capacidade de utilizar as redes WAN para mais do que a conexão a diferentes RTUs para troca de dados, a terceira geração introduziu protocolos apropriados para redes WAN, como o IP, permitindo que todas as componentes de um sistema SCADA comuniquem entre si pela rede através de conexões via *Ethernet* [22, 25].

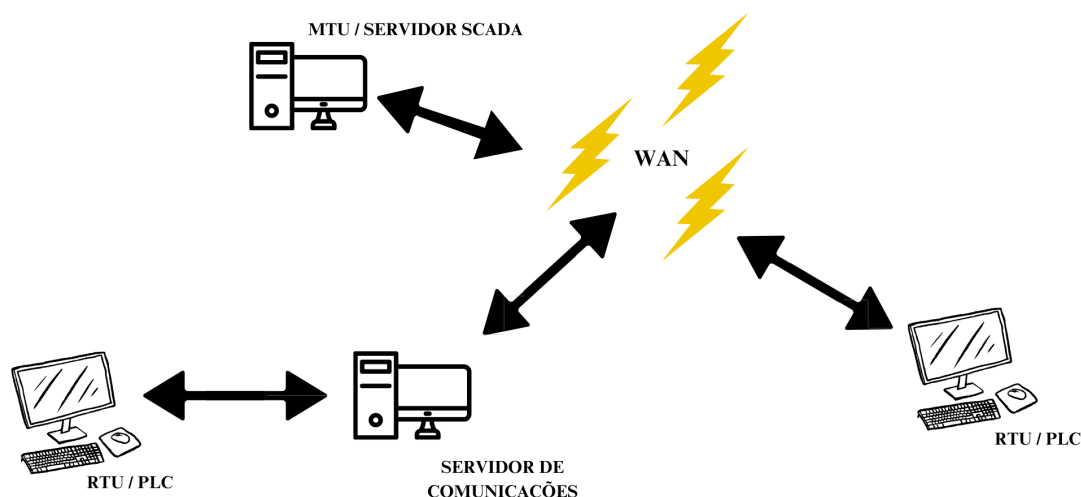


Figura 2.5: Arquitetura do sistema SCADA em rede.

2.5 Componentes do Sistema SCADA

Um sistema de supervisão, controlo e aquisição de dados integra diversas componentes de *hardware* e promove a comunicação entre diferentes *softwares* que funcionam de forma interligada. A coordenação eficaz entre sensores, atuadores, controladores e a rede de comunicação é fundamental para o desempenho do sistema, garantindo tanto a recolha e análise de dados como o controlo das operações e outras funcionalidades associadas. Para conceber um sistema SCADA funcional e eficiente, é possível considerar uma variedade de equipamentos e soluções, devidamente ajustados às especificidades do projeto.

Com o objetivo de proporcionar uma visão geral do sistema SCADA, esta Secção apresenta as componentes necessárias para que o sistema funcione na sua plenitude num contexto industrial geral. De seguida, estão listadas as principais componentes pertencentes a um sistema SCADA, aplicado a processos industriais.

- **Sensores e Atuadores**

Os sensores são dispositivos que detetam e medem variáveis físicas, químicas ou elétricas, convertendo essas medições em sinais que podem ser interpretados por sistemas eletrónicos. Existem diversos tipos de sensores, cada um projetado para medir uma variável específica, como temperatura, pressão e proximidade. Para o correto funcionamento do sensor, é necessário um dispositivo chamado transdutor, que atua como conversor do sinal do sensor, permitindo que este seja transmitido e processado pelos controladores [27].

Os atuadores desempenham um papel vital na execução de comandos físicos recebidos dos controladores. Ao receberem sinais de controlo, esses dispositivos realizam ações como mover mecanismos, abrir ou fechar válvulas, ajustar posições ou ligar e desligar motores. Dependendo da fonte de energia utilizada, os atuadores podem ser classificados em elétricos, pneumáticos, hidráulicos ou térmicos. Cada tipo de atuador é escolhido com base nas exigências específicas de cada aplicação, como a necessidade de precisão, força ou rapidez [27].

- **Controladores**

Numa rede SCADA, existem componentes eletrônicos que têm a função de executar o controle local e remoto, em tempo real, dos processos industriais. Estas unidades são responsáveis por receber sinais dos sensores e comandar os atuadores, desempenhando um papel fundamental na automatização de processos, sendo grande parte das vezes o centro de toda a ação industrial em questão [15].

A realização do controle de um sistema industrial é complexa e dinâmica, não podendo ser categorizada de forma igual, tendo que ser analisada caso a caso. Posto isto, o controlador pode ser representado por várias componentes, dependendo de como o processo foi idealizado. Entre as diversas soluções aplicadas na indústria, as mais comuns são o *Programmable Logic Controller*, a *Remote Terminal Unit* ou a *Master Terminal Unit* [10, 28].

Estas implementações irão sempre basear-se consoante o que está a ser controlado por cada controlador e que protocolos de comunicação são utilizados. Na mesma configuração pode, por exemplo, haver um PLC a controlar um número específico de tarefas, porém existir também uma RTU que coordena outras tarefas, e uma MTU que controla o PLC e a RTU. Outro exemplo de configuração é a utilização de uma RTU configurada apenas para acumular dados, frequentemente associada diretamente aos sensores de campo, sendo, neste caso, comumente designada por *datalogger* [15].

- **Sistema SCADA**

O sistema SCADA está organizado em três componentes principais: o servidor SCADA, o *software* SCADA e a interface SCADA, também denominada *Human Machine Interface* (HMI). A Figura 2.6 ilustra visualmente estes elementos, que constituem a base do funcionamento integrado do sistema. Estes três elementos permitem a comunicação eficiente entre sensores, atuadores e controladores, além da execução das funções definidas. É importante salientar que as funções e necessidades destes elementos estão interligadas, tornando inviável a existência de uma rede SCADA sem a presença de todos eles.

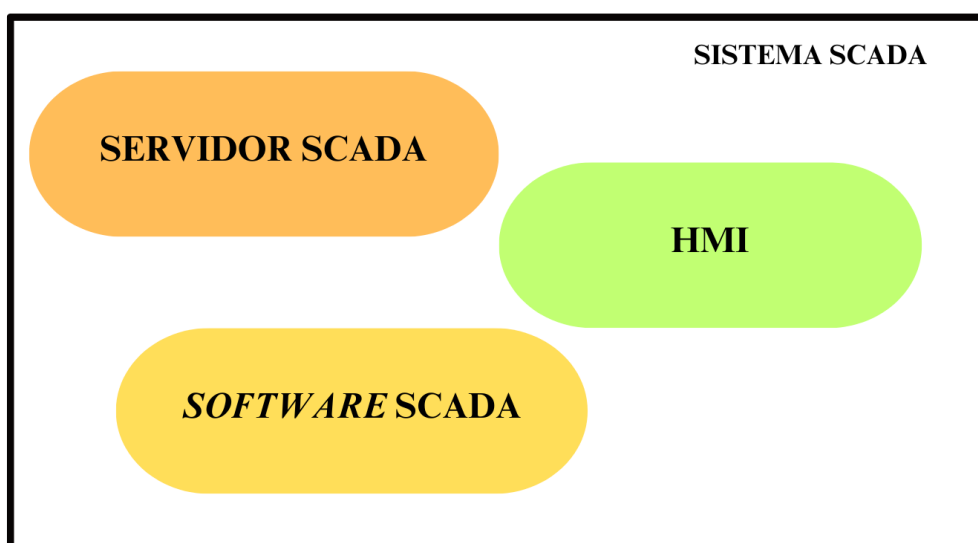


Figura 2.6: Representação do sistema SCADA.

– Servidor SCADA

O servidor SCADA é o cérebro de toda a operação, onde são processadas e armazenadas as informações recebidas dos níveis de campo e controlo. Este servidor pode estar localizado numa sala de controlo ou integrado em outras componentes da operação específica, como um PLC, ou uma RTU, ou pode ser independente fisicamente, estando alojado num PC industrial que executa o *software* SCADA. Este servidor pode ter também a função de uma MTU, sendo responsável por controlar qualquer dispositivo da central [28].

Internamente ao servidor SCADA, existe o *Input/Output (I/O) Server*, que é uma componente de controlo responsável por recolher, armazenar e fornecer acesso às informações de processo provenientes de componentes de controlo [15]. Ainda pertencente ao servidor SCADA, existe um módulo de processamento de protocolos capaz de gerir os diferentes protocolos de comunicação do sistema, garantindo a troca de informações de forma eficiente, segura e em conformidade com os protocolos de comunicação adotados. Este servidor serve de intermediário entre as componentes de campo e a central de supervisão.

– Human Machine Interface

A *Human Machine Interface* é uma interface gráfica que permite aos operadores interagir com o sistema SCADA de forma intuitiva e eficaz. Este dispositivo é essencial em sistemas SCADA, pois proporciona uma visualização em tempo real do estado do processo, permitindo que os operadores monitorizem os dados críticos e realizem ações manuais de controlo diretamente. Além disso, a HMI facilita a análise rápida e a resposta imediata a eventos, otimizando a supervisão e aumentando a segurança operacional.

Esta interface gráfica é personalizável, permitindo configurar diferentes visualizações para destacar as variáveis mais relevantes ao operador, conforme as necessidades específicas de cada processo industrial [15, 28].

Na sua utilização, são aplicáveis sinóticos, que consistem em representações gráficas do sistema. Os sinóticos fornecem uma visão esquemática e detalhada de todos as componentes e variáveis monitorizados no processo em questão. Estas representações são projetadas para transmitir, de forma clara e imediata, o estado operacional do sistema. Além disso, os sinóticos facilitam a identificação de anomalias e permitem ao operador antecipar ações de manutenção e ajustes operacionais quando necessário.

– Software SCADA

O *software* SCADA deve ser uma plataforma robusta, escalável e de fácil utilização, capaz de fornecer funcionalidades completas de monitorização, controlo e análise. O *software* deve integrar-se perfeitamente com o *hardware* do processo industrial e com outros sistemas existentes, garantindo uma operação eficiente e fiável.

O *software* de um sistema SCADA é composto por diversos elementos que trabalham em conjunto para garantir a supervisão, a aquisição de dados e o controlo eficaz dos processos industriais. Na Tabela 2.1 estão destacadas as principais componentes que constituem o *software* do sistema SCADA [15, 22, 27].

Para garantir um funcionamento eficaz, é imperativo que todas as componentes de *software* formem um ecossistema interligado, possibilitando a troca constante de informações entre as componentes.

Tabela 2.1: Componentes e funcionalidades de um sistema SCADA.

Componente	Descrição
Software de supervisão e controle	Esta é a função central do SCADA, permitindo que os operadores monitorizem e controlem os processos industriais em tempo real. O <i>software</i> exibe informações, permite o controlo remoto e ajusta parâmetros do sistema com base nos dados recebidos.
Base de dados	A base de dados armazena todas as informações relevantes do sistema, registando parâmetros operacionais, dados capturados por sensores, atuadores e controladores, eventos e alarmes, entre outras métricas. Esta componente garante assim a integridade e acessibilidade dos dados ao longo do tempo.
Historian	Dentro da base de dados, existe uma componente denominada <i>Historian</i> . Este <i>software</i> atua como uma extensão focada no armazenamento de dados a longo prazo, permitindo análises de tendências, elaboração de relatórios detalhados e comparação de desempenho. Essas informações são fundamentais para suportar a tomada de decisões e melhorar o desempenho do sistema.
Sistema de gestão de alarmes	Este sistema monitoriza continuamente as operações, identificando condições anómalas e alertando os operadores sobre eventos que requeiram atenção imediata, possibilitando ações de correção. Esta funcionalidade permite garantir a segurança e a eficiência operacional, tanto como a prontidão na resolução de problemas.
Relatórios e módulos de análise	O sistema SCADA gera relatórios personalizados sobre o desempenho do sistema, eficiência energética, falhas e padrões de operação. Estes relatórios, juntamente com módulos que oferecem ferramentas para processar e visualizar dados, permitem uma melhor compreensão dos padrões operacionais e facilitam a análise e melhoria dos processos, apoiando a tomada de decisões informadas.

• Componentes de Comunicação

A comunicação desempenha um papel crucial no funcionamento de um sistema SCADA, permitindo a interação eficiente entre as diversas componentes e garantindo a transmissão de dados necessária para a supervisão e controlo do sistema.

Para que a arquitetura do sistema seja viável e eficaz, é essencial a presença de componentes que suportem diferentes tipos de comunicação, desde redes locais até conexões remotas. Há diversos equipamentos utilizados para criar ligações entre componentes, sendo uns mais úteis em diversas situações e outros em outras.

Na Tabela 2.2 estão presentes as principais componentes de comunicação, juntamente com a sua descrição e funcionalidade.

Tabela 2.2: Dispositivos de comunicação num sistema SCADA.

Dispositivo	Descrição
Switches	Os <i>switches</i> são dispositivos responsáveis pela conexão de múltiplas componentes numa rede local, garantindo a comunicação eficaz entre o controlador do sistema, os dispositivos de campo e o servidor SCADA, assegurando a ligação entre todos os elementos.
Gateways	Os <i>gateways</i> são dispositivos que permitem a conversão do protocolo de comunicação, possibilitando que elementos com diferentes protocolos possam comunicar entre si dentro da rede local do sistema SCADA.
Routers	Os <i>routers</i> são dispositivos essenciais para a comunicação, capazes de encaminhar dados entre diferentes redes. Eles possibilitam a comunicação entre dispositivos localizados em várias sub-redes, permitindo o acesso remoto e facilitando a interligação de instalações ou áreas geográficas distintas em sistemas SCADA [28].
Antenas	As antenas são necessárias para transmitir e receber comunicações sem fio, facilitando a troca de dados entre dispositivos e o sistema SCADA. Em cenários onde os meios físicos são impraticáveis, as antenas viabilizam a comunicação.
Remote Access Points	Os <i>access points</i> permitem que dispositivos sem fio, como sensores e controladores, se conectem à rede SCADA. Esta funcionalidade é particularmente útil em áreas onde a instalação de cabos é difícil ou dispendiosa [28].
Modems	Os <i>modems</i> facilitam a comunicação entre redes digitais e analógicas, sendo capazes de converter sinais analógicos em digitais e vice-versa, permitindo que diversos dispositivos se conectem. Esta componente é crucial em cenários remotos, onde a comunicação via linha telefónica ou rede móvel se torna necessária [10].
Repetidores de Sinal	Um repetidor de sinal é utilizado para garantir a comunicação eficiente entre os dispositivos de campo e o sistema central de monitorização e controlo. É utilizado em redes que envolvem longas distâncias ou áreas com obstáculos físicos que afetam a qualidade da comunicação.

2.6 Arquitetura de Comunicações do Sistema SCADA

Um sistema SCADA requer uma rede de comunicações extensa e complexa. Para tal, é fundamental conhecer não só as suas componentes, mas também a arquitetura de comunicações, desde o meio físico que as conecta ao sistema, até aos protocolos de comunicação utilizados para fazer chegar a informação devida.

2.6.1 Arquitetura e Topologia de Rede

Os sistemas SCADA integram dois tipos de ligação entre as componentes, redes cabladas e redes sem fio. A escolha entre elas, ou a combinação de ambas, depende de fatores como as características das componentes, as exigências da aplicação, o alcance necessário, a taxa de transmissão de dados e o ambiente operacional [10]. Posto isto, de seguida estão descritas as diferentes tecnologias utilizadas nas redes cabladas e nas redes *wireless*.

- **Redes Cabladas**

As redes cabladas são amplamente utilizadas em sistemas SCADA devido à sua elevada confiabilidade, segurança e resistência a interferências externas. Estas redes utilizam diversas tecnologias para assegurar uma comunicação robusta em ambientes industriais. A seguir, apresentam-se as tecnologias mais relevantes.

- **Comunicação em Série**

As comunicações em série, tecnologias como o *RS-232* e o *RS-485*, são frequentemente empregues em equipamentos menos recentes, em distâncias curtas ou médias. Este tipo de comunicação opera *bit a bit* e é realizado através de um único fio ou de um par de fios.

A tecnologia *RS-232*, mais antiga, permite comunicações em distâncias bastante curtas na escala industrial, por outro lado, comunicar através de *RS-485* permite suportar distâncias de até 1200 m e possibilita a ligação de múltiplos dispositivos numa única linha, sendo assim uma escolha adequada para redes de sensores distribuídos e controladores remotos [29].

- **Comunicação por Ethernet**

A tecnologia *Ethernet* destaca-se por oferecer alta velocidade de transmissão e por ser compatível com os protocolos TCP/IP, o que a torna essencial para a integração de dispositivos em redes locais. Esta tecnologia utiliza tipicamente cabos de cobre, mais especificamente o cabo *Ethernet RJ-45*. Estes cabos são amplamente utilizados devido à sua facilidade de implementação, baixo custo e confiabilidade.

- **Comunicação por Fibra Ótica**

A fibra ótica pode ser usada como meio físico de protocolos compatíveis com *Ethernet*, substituindo os tradicionais cabos de cobre. Oferece vantagens significativas, como alta largura de banda, maior alcance e imunidade a interferências eletromagnéticas. É amplamente utilizada para interligar dispositivos em longas distâncias ou em ambientes industriais críticos.

- **Redes Sem Fio**

As redes sem fio permitem conectar diversas componentes à *Internet* ou a outros dispositivos sem a necessidade de cabos ou fios. Estas redes oferecem flexibilidade e mobilidade, características essenciais em locais onde a instalação de cabos é difícil ou impraticável.

No desenvolvimento de um sistema SCADA moderno, é essencial usar tecnologias sem fios de forma a agilizar a aquisição de dados, controlar remotamente o sistema e supervisionar em tempo real a atividade. De seguida, estão listadas algumas das tecnologias mais comuns em sistemas SCADA no ramo industrial.

- **Wi-Fi**

O *Wi-Fi* é uma tecnologia de rede sem fios amplamente utilizada, permitindo a comunicação entre dispositivos através de ondas eletromagnéticas. Esta tecnologia é particularmente vantajosa em ambientes industriais, pois oferece uma comunicação de alta velocidade e baixo custo para dispositivos conectados localmente. Para além disto, o *Wi-Fi* apresenta uma largura de banda extensa, ou seja, uma elevada capacidade de transmissão de dados.

O *Wi-Fi* é ideal para sistemas que exigem mobilidade e flexibilidade, permitindo a monitorização e controlo de componentes de forma dinâmica. É extensamente utilizado para redes locais. Apesar do seu alcance ser limitado em comparação com outras tecnologias sem fios, a sua facilidade de instalação e suporte em ambientes industriais torna-o uma opção popular para sistemas SCADA em áreas cobertas por infraestrutura de comunicação sem fios [30].

– ***Zigbee***

O *Zigbee* é uma tecnologia de comunicação sem fio de padrão aberto, adequada para aplicações de *Internet of Things* (IoT), consumindo pouca energia e sendo uma solução de baixo custo. Esta tecnologia é projetada para comunicações de curto alcance, sendo amplamente utilizada em sensores e dispositivos de monitorização [31]. O *Zigbee* é altamente confiável para formar redes em malha, nas quais cada dispositivo pode atuar como repetidor ou como *router*, propagando o sinal diretamente.

– ***LoRa***

O *LoRa* é uma tecnologia de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, ideal para sistemas SCADA que exigem transmissão de dados em áreas remotas. Esta tecnologia, além de ter uma exigência muito baixa, tem a capacidade de alcançar até 15 km em áreas rurais, sendo adequada para aplicações de monitorização e medição inteligente em ambientes industriais [31]. Esta tecnologia é extremamente útil para aplicações com o uso de IoT, sendo ideal para controlos remotos e para sensores inteligentes, podendo operar em longas distâncias.

– ***4G / 5G***

As tecnologias *4G* e *5G* representam as gerações mais recentes da rede móvel, oferecendo não só alta capacidade de transmissão de dados, mas também baixa latência, características essenciais para sistemas SCADA. O *4G* tem sido adotado em áreas onde a conectividade com cabos não é viável, oferecendo soluções eficazes para monitorização remota e controlo em tempo real [32].

Com a chegada do *5G*, a maior largura de banda e a latência ainda mais baixa proporcionam um desempenho significativamente superior, permitindo suportar uma maior densidade de dispositivos avançados e aplicações de grande escala. Essa capacidade é especialmente vantajosa para sistemas SCADA que exigem a troca rápida de dados e monitorização contínua, particularmente em ambientes industriais e locais remotos ou urbanos, onde a conectividade precisa ser mais robusta e segura [32].

Ao abordar um sistema SCADA, é igualmente relevante considerar os conceitos de redes LAN e WAN, distinguindo, respetivamente, uma rede local de uma rede de longa distância. Estas duas redes permitem conectar dispositivos em diferentes escalas geográficas e assegurar a continuidade da comunicação [33].

• ***Local Area Network***

As redes LAN são projetadas para cobrir áreas limitadas, como uma fábrica ou uma universidade, permitindo que dispositivos partilhem a mesma infraestrutura de comunicação. Nestas redes, tanto as conexões com fios como as sem fio são amplamente utilizadas. As LAN são caracterizadas pela sua baixa latência, alta velocidade e controlo centralizado, tornando-se ideais para sistemas SCADA que necessitam de monitorização em tempo real.

- **Wide Area Network**

As redes WAN conectam várias LAN distribuídas por regiões geográficas extensas. Estas redes são essenciais para sistemas SCADA que requerem supervisão remota de múltiplas instalações. A *Internet* é o exemplo mais abrangente e complexo de uma WAN, pois interconecta diversas redes LAN e também redes WAN, pelo mundo, formando uma rede de alcance global.

2.6.2 Protocolos de Comunicação

Os protocolos de comunicação desempenham um papel fundamental na operação de sistemas SCADA, estabelecendo um conjunto de regras e convenções que possibilitam a troca de informações entre diferentes dispositivos ou sistemas. No contexto da automação industrial, estes protocolos garantem que controladores, sensores e atuadores interajam de forma eficiente e coordenada [34].

Quando se aborda um protocolo de comunicação, é fundamental considerar dois aspetos principais: a hierarquia de comunicação e o padrão de comunicação, também conhecido como *messaging pattern* [35]. A definição destes parâmetros determina, em grande parte, a forma como o protocolo opera e a maneira como as diferentes entidades no sistema interagem com este protocolo.

A hierarquia de comunicação define a relação entre os dispositivos, seja de forma centralizada ou distribuída, enquanto que o padrão de comunicação especifica como as mensagens são trocadas, abordando aspetos como a direção da comunicação.

Ao longo dos anos, diversos protocolos foram explorados para a comunicação em redes SCADA, seguindo, principalmente, as hierarquias e padrões de comunicação que serão abordados de seguida.

- **Hierarquia de Comunicação**

Em relação à hierarquia de comunicação, podem destacar-se duas soluções: *Master-Slave* e *Client-Server*. Esta primeira, já brevemente mencionada na Secção 2.4, consiste num modelo onde há uma componente dominante, o mestre ou *master*, que controla as outras componentes escravas, ou *slaves*, sendo que não há possibilidade de uma *slave* fazer um pedido ao *master*. O mestre é o dispositivo que inicia as solicitações e controla a comunicação, já os escravos são os dispositivos que respondem às solicitações do mestre [36].

Esta forma de comunicação tende a cair em desuso devido à sua arquitetura rígida e limitada, pois centraliza todo o controlo no dispositivo mestre, criando um ponto único de falha e dificultando a escalabilidade do sistema. Ainda assim, a comunicação *Master-Slave* continua a ser utilizada em muitas aplicações devido à sua simplicidade, baixo custo de implementação e eficiência em sistemas com requisitos menos exigentes.

Já a hierarquia *Client-Server* caracteriza-se por uma interação flexível e descentralizada, onde a comunicação é bidirecional, permitindo que ambas as partes troquem mensagens de forma estruturada, sendo assim amplamente utilizada em soluções modernas de comunicação.

Neste modelo, o cliente solicita serviços ou dados ao servidor, que processa os pedidos e devolve uma resposta desejada. Podem haver múltiplos clientes emitindo solicitações para um servidor que está passivamente aguardando por elas. Assim, as operações no paradigma *Client-Server* são de solicitação e aceitação pelo cliente e de escuta e resposta pelo servidor [37].

Na Figura 2.7 [38] temos esta hierarquia de comunicação onde no centro estão os servidores, comunicando via *Internet* com os clientes, que podem ser *laptops*, *smartphones*, computadores *desktop*, entre outras componentes. Em configurações mais recentes, como é o caso desta Figura 2.7, podemos verificar que os servidores comunicam entre si na *cloud*, facilitando o acesso à informação e permitindo a integração de componentes utilizando IoT, como sensores e atuadores mais modernos. Estas tecnologias mais recentes serão discutidas no Capítulo 5 como otimizações aplicáveis aos sistemas SCADA na indústria.

Prosseguindo, pode-se verificar que essas hierarquias indicam a organização da estrutura da informação e a forma como ela é transmitida entre os diferentes pontos. Apesar da sua bidirecionalidade, a arquitetura *Client-Server* ainda mantém uma organização hierárquica centralizada, semelhante à arquitetura *Master-Slave*.

Posto isto, o modelo *Peer-to-Peer* (P2P) surge como uma alternativa às hierarquias tradicionais de comunicação, como os modelos *Master-Slave* e *Client-Server*, caracterizando-se por uma estrutura descentralizada onde todos os dispositivos, ou pares, têm, em princípio, o mesmo nível de autoridade e responsabilidade. No contexto de redes P2P, não existe um dispositivo central ou servidor dominante, em vez disso, cada nó da rede, conhecido como *peer*, pode atuar tanto como cliente quanto como servidor, dependendo da necessidade [39].

Num sistema P2P, a comunicação ocorre diretamente entre os pares, sem a necessidade de intermediários ou de um ponto único de falha, o que proporciona uma maior robustez e escalabilidade. Este sistema, contudo, não é o mais utilizado no contexto do SCADA, embora seja de extrema relevância quando se abordam protocolos de comunicação na sua generalidade.

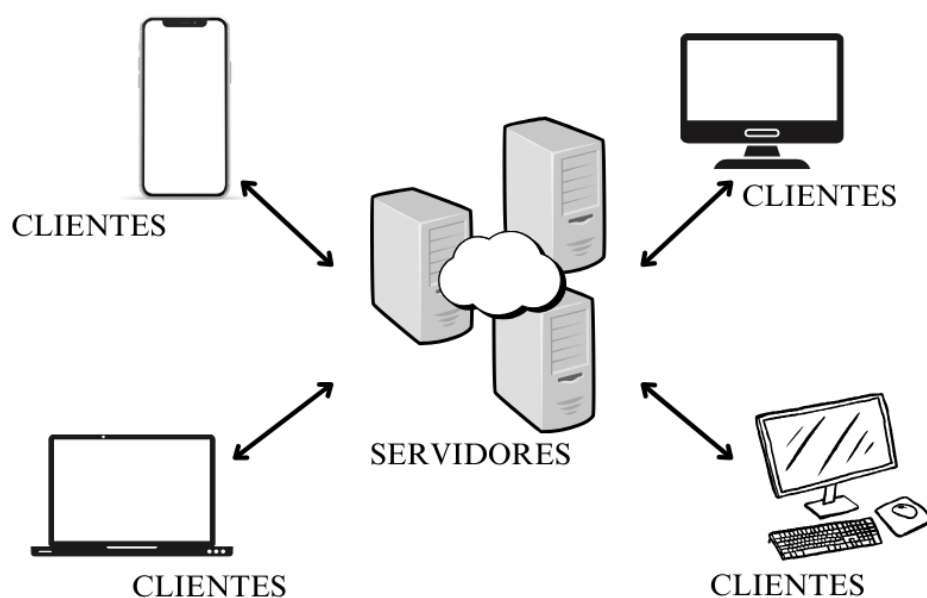


Figura 2.7: Representação da hierarquia de comunicação *Client-Server*.

- **Padrão de Comunicação**

Os padrões de comunicação podem ser classificados em duas formas de operação mais comuns: o *Request-Response* e o *Publish-Subscribe*. A primeira forma é amplamente utilizada, sendo aplicada em comunicações organizadas segundo ambos os modelos *Master-Slave* e *Client-Server*. Um exemplo de protocolo de comunicação que suporta ambas as hierarquias é o protocolo *Modbus* [36], cuja descrição será apresentada no Capítulo 3.

No padrão *Request-Response*, há um dispositivo que pede informação e outro que a recebe, processa e envia a mensagem em resposta. A diferença para a hierarquia está na bidirecionalidade da troca de mensagens, sendo que enquanto um *slave* nunca pode iniciar a comunicação, no contexto *Client-Server*, a troca de informação pode ser iniciada por qualquer uma das partes, dependendo do protocolo. Já o padrão de comunicação *Publish-Subscribe* é mais amplo. Neste modelo, existem dispositivos que subscrevem mensagens a outros e que as recebem sempre que seja do seu interesse, sendo que o dispositivo que as publica é responsável por enviar mensagens sem conhecimento prévio de quem irá recebê-las, enquanto o dispositivo assinante declara interesse em receber mensagens relacionadas a determinados tópicos ou critérios [40].

Entre estes dispositivos há, geralmente, uma componente intermediária, designada de *broker*, capaz de gerir a distribuição das mensagens. O *broker* garante que as mensagens enviadas pelos publicadores sejam entregues apenas aos assinantes interessados. Essa separação entre dispositivos elimina a necessidade de uma conexão direta entre eles, o que torna o modelo altamente escalável e flexível.

A Figura 2.8 ilustra duas configurações que utilizam o modelo *Client-Server*, com o padrão *Request-Response* à esquerda e o padrão *Publish-Subscribe* à direita [41]. Esta Figura é relevante, pois ilustra as configurações mais adequadas a sistemas modernos, os quais incluem acesso à rede *cloud* e a integração de dispositivos IoT, sendo estes sistemas associados a protocolos de comunicação de alta complexidade fundamentais para o futuro da indústria. Como já foi dito, estas otimizações são abordadas no Capítulo 5.

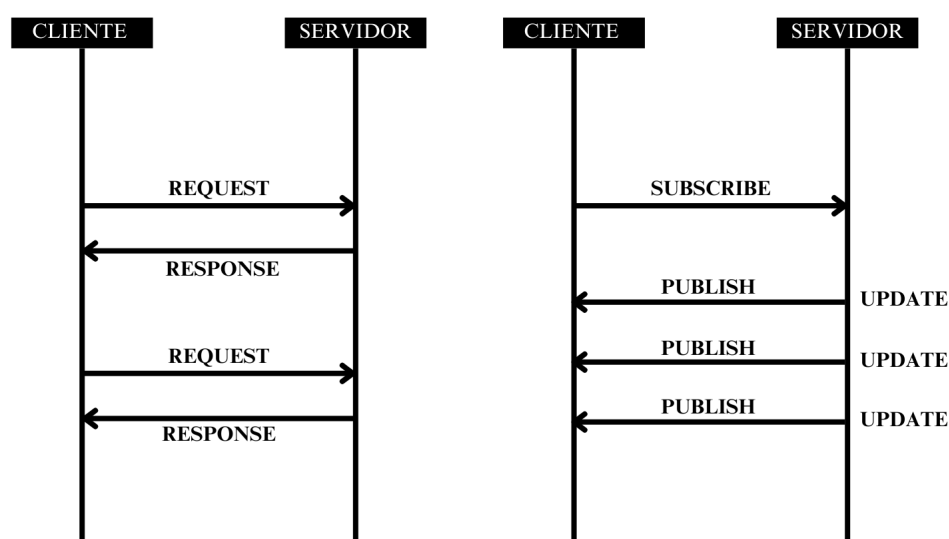


Figura 2.8: Comparação entre os padrões de comunicação *Request-Response* e *Publish-Subscribe*.

Capítulo 3

Sistema SCADA aplicado a Centrais Fotovoltaicas

Este Capítulo apresenta os tipos de centrais fotovoltaicas existentes em Portugal, destacando as suas características específicas, bem como as componentes essenciais e opcionais para o seu funcionamento adequado. Seguidamente, é descrito o processo de comunicação entre as componentes ativas da central fotovoltaica com o sistema SCADA. Este Capítulo detalha os dispositivos que integram uma central solar e a forma como estes interagem com o sistema SCADA.

3.1 Classificação da Central Fotovoltaica

O modo de operação do sistema SCADA irá depender do tipo de central fotovoltaica que está a ser analisado, sendo que essa classificação é feita com base na sua potência de ligação à Rede Elétrica de Serviço Público (RESP) [42, 43]. Em Portugal, existem quatro tipos de centrais solares fotovoltaicas (CSF), sendo que a Tabela 3.1 representa os diferentes tipos de central e a sua descrição.

Tabela 3.1: Classificação e caracterização das centrais fotovoltaicas.

Classificação	Descrição
Central do tipo A	Centrais de pequena dimensão, produzindo apenas até 1 MW de potência e sujeitas a pouca legislação. Este tipo de central está apto apenas a receber <i>setpoints</i> de potência ativa e reativa, e produz energia em baixa tensão (BT) que é, posteriormente, conectada à rede de média tensão (MT) a partir de um posto de transformação (PT).
Central do tipo B	Parques fotovoltaicos de maior dimensão, frequentemente dedicados à venda de energia para a rede. Este tipo de central é, geralmente, conectado à rede de alta tensão (AT) e produz entre 1 MW e 10 MW de potência de ligação.
Central do tipo C	Grandes centrais fotovoltaicas, comumente são projetos de utilidade pública e plantas que abastecem grandes áreas ou vendem energia em larga escala. Estas centrais estão conectadas à rede AT ou, por vezes, à rede de muito alta tensão (MAT), sendo que podem produzir entre 10 MW e 50 MW de potência.
Central do tipo D	Instalações de grande escala, com uma capacidade de produção energética superior a 50 MW. Devido à sua escala e importância estratégica, estas centrais estão sujeitas a requisitos técnicos particularmente rigorosos.

Para além da potência produzida, as centrais fotovoltaicas podem ter diferentes tipos de utilização e apresentar várias particularidades, dependendo do modelo de produção de energia. De uma forma geral, o termo CSF refere-se a qualquer tipo de central fotovoltaica, porém existem diversas características que distinguem algumas centrais. De seguida, são apresentados quatro desafios atuais e comuns numa central fotovoltaica:

- **Unidade de Pequena Produção**

Em Portugal, o termo unidade de pequena produção (UPP) é amplamente utilizado para designar centrais de menor dimensão e capacidade de produção, sendo relevante conhecer esta designação devido à sua utilização recorrente a nível nacional [44]. Este tipo de central solar possui uma capacidade máxima de produção de potência de 1 MW. A energia gerada é consumida localmente, normalmente nas proximidades do ponto de produção, sendo classificada como uma instalação de produção descentralizada [45].

- **Unidade de Produção para Autoconsumo**

Uma unidade de produção para autoconsumo (UPAC) é um sistema de produção de energia instalado para consumo próprio, podendo ser implementado em residências, empresas ou edifícios. Neste sistema, a energia gerada é consumida diretamente pelo produtor e, apenas em caso de excedente, é injetada na rede elétrica, proporcionando ao produtor uma compensação pela operadora da rede, mediante licença [46, 47].

Este modelo tem sido incentivado em Portugal e na Europa, como parte das estratégias de descarbonização e promoção da eficiência energética. Isto deve-se ao facto de as UPACs criarem independência para o consumidor e, ao mesmo tempo, aumentarem a produção energética através de fontes renováveis, ajudando a cumprir objetivos de sustentabilidade e acelerando a transição energética.

- **Armazenamento de Energia**

Atualmente, o armazenamento de energia é uma consideração importante para as centrais fotovoltaicas, permitindo aumentar a rentabilidade de um parque solar. Através de sistemas de armazenamento com baterias, conhecidos como *Battery Energy Storage Systems* (BESS), é possível armazenar o excesso de energia gerada para utilização posterior, possibilitando uma gestão mais eficiente da venda de energia à rede elétrica [48]. Estas centrais que envolvem sistemas de armazenamento exigem duas componentes essenciais para este efeito, sendo estas o *Battery Management System* (BMS) e o *Energy Management System* (EMS), explicadas com detalhe na Secção 3.2.

A central fotovoltaica de Alcútem, pertencente à *Galp* e construída pela Jayme da Costa, está a receber a implementação de baterias de forma a armazenar o excedente de energia produzida. O projeto a ser implementado está representado na Figura 3.1. Este processo de renovação da central irá permitir à *Galp* "armazenar a energia solar gerada em períodos de elevada produção e utilizá-la em períodos de maior procura, maximizando o valor da energia" [49]. Este testemunho comprova a motivação atual de implementar estes sistemas nas centrais já existentes, como a de Alcútem, e ainda de desenvolver centrais mais modernas, com armazenamento energético no seu plano inicial.



Figura 3.1: Projeto de baterias na central fotovoltaica de Alcoutim.

- **Hibridização Eólica**

A hibridização é uma solução inovadora para aumentar a eficiência das centrais fotovoltaicas, combinando a produção solar com a eólica, combinando duas fontes de energia renovável na mesma central. Estas centrais híbridas podem ser projetadas desde o início ou adaptadas a partir de infraestruturas preexistentes, sejam elas previamente fotovoltaicas ou eólicas. Esta abordagem revela-se particularmente vantajosa devido à complementaridade entre a produção de energia solar e eólica. De forma geral, em períodos de maior radiação solar, a intensidade do vento tende a ser menor, enquanto em momentos de maior atividade eólica, a incidência solar é reduzida. Esta relação inversa permite equilibrar a produção de energia, garantindo uma oferta mais estável e contínua ao longo do tempo. Exemplos destas soluções têm sido implementados em vários países europeus, com resultados promissores na integração de fontes renováveis.

Na Península Ibérica, a primeira central híbrida foi desenvolvida pela EDP Renováveis, em Sabugal, onde foi adaptada uma central eólica existente, sendo possível ver a mesma na Figura 3.2. Este processo de hibridização de ativos previamente instalados é "uma das principais vias de crescimento das energias renováveis, com vários benefícios para o setor: aumento da eficiência dos projetos, utilização e partilha de infraestruturas elétricas já existentes, promoção da estabilidade de custos e redução do impacto ambiental" [50].

Neste tipo de central, a JdC é pioneira na ilha da Madeira, estando envolvida na primeira hibridização do arquipélago, conjugando a já existente central eólica com energia fotovoltaica [51]. A Jayme da Costa irá implementar a produção fotovoltaica de forma a adaptar a central para passar a gerar energia a partir das duas fontes renováveis.

Considerando o avanço da geração solar, conclui-se que, em instalações futuras, o ideal será integrar os conceitos de armazenamento de energia com a produção híbrida, de modo a alcançar resultados ainda mais eficientes.



Figura 3.2: Central híbrida desenvolvida pela EDP Renováveis.

3.2 Componentes da Central Fotovoltaica

O funcionamento de uma central solar envolve várias etapas, desde a captação da energia solar pelas células fotovoltaicas até à sua injeção na rede elétrica. O processo principia nos painéis solares, onde a radiação solar é absorvida e permite a geração de corrente contínua (CC), através do efeito fotovoltaico.

As células fotovoltaicas estão ligadas a inversores, responsáveis por transformar a corrente contínua gerada em corrente alternada (CA), sendo este o tipo de corrente utilizado na rede elétrica. Após a conversão, a energia passa por uma subestação elétrica e, a partir de um transformador, a tensão é elevada de BT para MT, possibilitando o envio da energia para a rede elétrica, ou *grid*, onde será distribuída aos consumidores finais. No caso de centrais de maior dimensão, haverá vários tipos de subestação, sendo, primeiramente, e próximo aos inversores, um ou mais sistemas capazes de converter a tensão BT para tensão MT, neste caso conhecidos como postos de transformação, e poderão haver outras subestações elétricas que convertem a tensão MT para tensão AT, ou até de AT para MAT, ligando, por fim, a energia produzida pela central à rede pública.

Na Figura 3.3 é apresentada uma visão simplificada do processo de geração de energia numa central até à sua integração na rede elétrica. Note-se que a seta vermelha indica o fluxo de corrente contínua, enquanto que as setas azuis representam o fluxo de corrente alternada, após a conversão de CC para CA através dos inversores. Na Figura 3.4 é possível verificar um posto de transformação desenvolvido pela Jayme da Costa, presente numa central fotovoltaica desenvolvida pela empresa. Já na Figura 3.5 está presente uma subestação elétrica, também fabricada e implementada pela empresa.

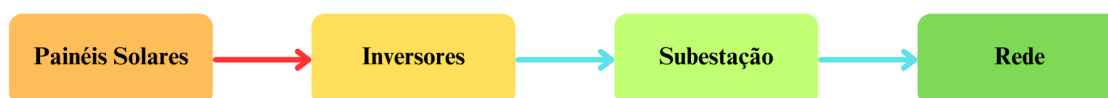


Figura 3.3: Visão simplificada da central solar fotovoltaica.



Figura 3.4: Posto de transformação desenvolvido pela Jayme da Costa.



Figura 3.5: Subestação elétrica desenvolvida pela Jayme da Costa.

Com o intuito de compreender melhor o comportamento elétrico da central, é possível expandir a Figura 3.3 num esquema unifilar, descrito no Anexo A. Neste esquema encontram-se representadas as ligações em baixa tensão a partir de quatro inversores de *string* conectados a quatro *strings* de 28 módulos fotovoltaicos.

Também é possível observar a ligação dos inversores ao transformador, bem como outras conexões elétricas relevantes, culminando na ligação da energia à RESP. É importante salientar que o esquema apresentado é genérico e aplica-se a uma central do tipo UPP, com apenas uma subestação, sendo esse o PT representado no esquema.

Com base neste esquema elétrico, são de seguida apresentadas e desconstruídas as principais componentes de uma central fotovoltaica, tendo em conta a sua relevância para o sistema SCADA e salientando a sua necessidade no sistema como um todo.

- **Painel Solar**

O funcionamento de uma central solar depende dos painéis solares que a constituem, capazes de converter a radiação solar em energia elétrica. Para uma análise precisa do desempenho de uma central, é fundamental considerar não apenas o tipo de painel solar escolhido, mas também a sua orientação e inclinação, sendo estes fatores essenciais para otimizar a captação e conversão da energia solar.

- **Célula Solar**

A partir de um conjunto de células fotovoltaicas, em inglês *solar cells*, interligadas, obtemos o que chamamos de painel fotovoltaico, também conhecido como módulo solar, ou *solar module* em inglês [52]. As células fotovoltaicas são responsáveis pela conversão da luz solar em energia elétrica, sendo a componente básica dos sistemas solares. Quando conectamos vários desses painéis em série, obtemos uma *solar string*, e ao agrupar várias *strings* em paralelo, formamos um *solar array*, o que aumenta a capacidade de geração de energia, proporcionando uma maior produção. A Figura 3.6 ilustra visualmente esse processo, mostrando as interligações desde as células até à formação do *solar array* [53].

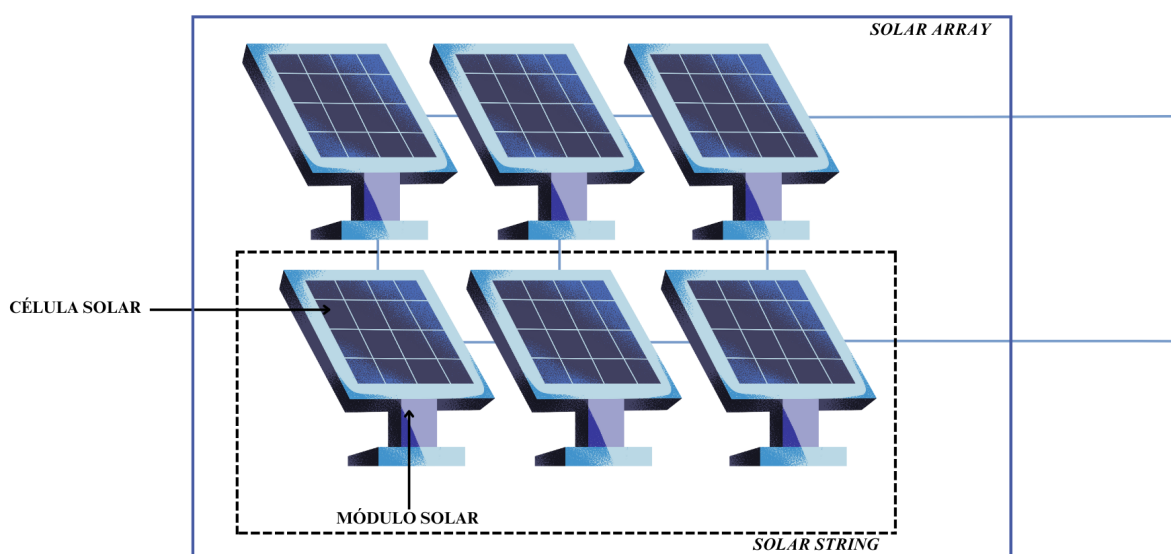


Figura 3.6: Configurações a partir de células fotovoltaicas.

– Tipos de Pannel Solar

A escolha do tipo de pannel solar para o parque fotovoltaico é uma parte crucial do processo. Esta decisão dependerá da topografia do local, da capacidade de produção do parque e, por fim, das necessidades do cliente, bem como do orçamento disponível para o projeto.

Os dois tipos de painéis solares mais utilizados na indústria são os policristalinos e os monocristalinos. A diferença entre eles reside no tipo de células solares que os compõem, uma vez que um pannel solar é, essencialmente, um conjunto de células, como mostra a Figura 3.6 [54].

Os painéis policristalinos são o primeiro tipo a considerar. São mais simples de produzir, pois são compostos por múltiplos cristais de silício, o que os torna mais acessíveis. No entanto, apresentam uma eficiência baixa. Segundo diversos estudos, esta ronda os 13% a 20%. Além disso, este tipo de pannel ocupa mais espaço. Devido a estas desvantagens, a sua utilização tem diminuído ao longo dos anos, com uma preferência crescente pela instalação de painéis monocristalinos em novos parques [1, 2].

Os painéis monocristalinos, por outro lado, são compostos por um único cristal de silício, o que lhes confere uma eficiência mais elevada, situando-se entre 15% e 24%. Estes painéis têm um desempenho superior em condições de baixa luminosidade e ocupam menos espaço, razão pela qual o seu uso tem aumentado significativamente nos últimos anos [1, 2].

Na Figura 3.7 [55], podemos ver um módulo solar monocristalino, representado à esquerda, e um pannel solar policristalino, representado à direita.

É relevante mencionar também os painéis bifaciais, que conseguem captar luz de ambos os lados, aumentando a produção de energia ao absorver a luz refletida pelo solo. Este tipo de pannel é especialmente útil em locais de baixa luminosidade, podendo aumentar a produção energética até 10%. Podem ser instalados em estruturas elevadas ou suportes que maximizem a exposição à luz. Estes painéis podem ser constituídos tanto por células monocristalinas como policristalinas [56, 57].



Figura 3.7: Comparação entre painéis solares monocristalinos e policristalinos.

– Posição de um Painel Solar

A geração de energia através de módulos fotovoltaicos baseia-se na incidência da radiação solar nos painéis. Para maximizar a eficiência deste processo, é essencial considerar a posição dos painéis, a fim de captarem a maior quantidade possível de energia solar. Neste sentido, é fundamental analisar o local de instalação dos painéis solares e o ciclo solar ao longo do ano na região em questão, dado que estes fatores influenciam diretamente o desempenho do sistema fotovoltaico.

Os painéis solares podem ser instalados em suportes fixos, com uma inclinação específica definida após a análise ao local, ou podem ser montados em estruturas com *trackers*. Estes últimos permitem o movimento dos módulos solares ao longo do dia, ajustando continuamente a sua orientação para acompanhar a trajetória do sol.

• *Trackers*

Tendo em conta a importância da posição dos painéis solares e a necessidade de maximizar a incidência solar nas células fotovoltaicas, destacam-se os *trackers* como uma componente essencial para o aumento da eficiência energética. Estes dispositivos são projetados para ajustar a inclinação (eixo vertical) e/ou a orientação (eixo horizontal) dos painéis solares, de acordo com a posição do sol, maximizando a radiação convertida em eletricidade [1].

A Figura 3.8 mostra uma central fotovoltaica onde os módulos solares são montados sobre *trackers*, sendo possível verificar a diferença na posição dos painéis fotovoltaicos, dependendo da radiação solar que cada painel pode receber no local em que se encontra.

Para cumprir esta função, os *trackers* são geridos por um sistema de controlo que ajusta a inclinação dos dispositivos com base no ângulo definido para cada momento do dia, em tempo real, sendo o comando atualizado em curtos intervalos de tempo. Este sistema não só permite alterar a posição dos módulos solares de forma eficiente, mas também garante a segurança dos equipamentos, colocando-os numa posição de proteção, tipicamente horizontal, em condições climáticas adversas.



Figura 3.8: Instalação de módulos solares equipados com *trackers* numa central fotovoltaica.

O tipo de *trackers* mais comum é o de eixo único, que permite ajustar a posição dos painéis numa única direção, geralmente no sentido horizontal. Estes dispositivos seguem o movimento aparente do sol ao longo do dia, do nascente para o poente.

No hemisfério norte, como em Portugal, os *trackers* são geralmente instalados com o eixo de rotação orientado no sentido norte-sul, ou seja, com um azimute de 180 graus [58]. Esta configuração maximiza a captação de radiação solar, permitindo que os painéis acompanhem o movimento solar de este a oeste durante o dia, o que resulta num aumento significativo da eficiência energética.

- **Inversores**

No contexto da geração energética, um inversor é um conversor de corrente contínua para alternada, utilizado para converter a corrente gerada pelas células solares para corrente alternada, sendo uma componente crítica no funcionamento de uma central. Numa central fotovoltaica existem duas configurações mais usuais, sendo os inversores centralizados e os descentralizados.

Atualmente, os inversores mais modernos são equipados com algoritmos avançados de forma a monitorizar o ponto de máxima potência, integrados diretamente no seu sistema de controlo, denominados *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Estas técnicas são cruciais para maximizar a eficiência dos painéis solares, ajustando dinamicamente a carga elétrica aplicada ao sistema para garantir que os painéis operem continuamente no ponto de potência máxima, o seu *Maximum Power Point* (MPP) [1].

O ponto de potência máxima varia com as condições ambientais, como a intensidade da radiação solar e a temperatura dos módulos fotovoltaicos. Assim, o algoritmo de *Maximum Power Point Tracking* ajusta a tensão e a corrente dos painéis para extrair a quantidade máxima de energia em tempo real. Este processo é particularmente importante em centrais fotovoltaicas com condições irregulares, como sombras parciais ou diferenças de orientação entre módulos.

Para além disto, os inversores também devem ser capazes de regular *setpoints*, tais como valores de referência para a potência ativa ou reativa. Estes valores são recebidos a partir de um *Power Plant Controller* (PPC) e são usados para guiar o comportamento de equipamentos na rede SCADA, tornando todo o sistema de produção energética mais eficiente e dinâmico.

- **Inversores Centralizados**

Os inversores centralizados são projetados para converter a energia gerada por diversas *strings*, num único inversor de grande capacidade. Esta configuração garante a redução do número de equipamentos na central, tornando a manutenção mais fácil e também mais económica, sendo muito praticada em centrais de grande escala.

No entanto, esta solução é menos eficiente e a confiabilidade é limitada, sendo que, havendo uma falha no inversor, pode levar à interrupção da operação de todo o sistema fotovoltaico. Esta configuração obriga a que os painéis solares operem à mesma tensão, o que pode levar a desajustes entre os diferentes módulos. Caso os módulos recebam níveis distintos de irradiação, torna-se difícil alcançar o MPP do sistema, resultando em perdas de energia [59].

Neste caso, poderá haver a existência de uma caixa de junção elétrica de forma a juntar as diferentes *strings* e organizar a conversão energética, para além de passar a haver um local focalizado que inclui os disjuntores associados aos inversores.

– Inversores Descentralizados

Os inversores descentralizados, ou inversores de *string*, são instalados próximos às *strings* de painéis fotovoltaicos e distribuídos ao longo do parque fotovoltaico. Esta configuração é vantajosa em locais onde o espaço disponível precisa de ser utilizado de forma mais cautelosa e distribuída.

Comparativamente aos inversores centralizados, os inversores de *string* possuem menor potência individual, mas estão presentes em maior quantidade dentro de uma central, o que resulta numa distribuição mais homogênea da produção de energia. Nesta situação, é comum a existência de um quadro de proteção de inversores (QPI), que serve para alocar os disjuntores que protegem o sistema elétrico em caso de falha ou avaria. A partir das Figuras 3.9 e 3.10 podemos verificar, respetivamente, um inversor de *string* e os disjuntores presentes num quadro de proteção.

Uma desvantagem nesta prática é que, como os módulos estão ligados em série, o sombreamento ou mau funcionamento de um dos painéis afeta a produção de toda a *string*. Contudo, como a produção está seccionada em diferentes *strings*, o problema será localizado apenas nessa parte específica da central, sem comprometer o desempenho global do sistema [60].

Em certos casos, na utilização de inversores de *string*, pode haver a necessidade de uma caixa de comunicações, ou *ComBox*, que irá conectar os inversores ao SCADA, isto no caso de haver um elevado número de inversores, ou por motivos logísticos, ou até por conveniência a nível de cablagem. Outra particularidade que a *ComBox* pode ter, é a capacidade de ser ligada, diretamente, à estação meteorológica, condensando num só equipamento diversas ligações e componentes de uma central fotovoltaica.



Figura 3.9: Inversor descentralizado presente numa central fotovoltaica.



Figura 3.10: Disjuntores do QPI presente numa central fotovoltaica.

- **Estação Meteorológica**

Uma estação meteorológica, conhecida também como *meteorological station* ou *meteorological datalogger*, é um equipamento que agrega a informação recolhida através de diversas componentes e que visa supervisionar variáveis ambientais, tais como a temperatura, velocidade do vento e irradiância solar [27].

Na Tabela 3.2, estão listadas as principais componentes pertencentes a um *meteorological datalogger* e a sua função e propósito de instalação. É de salientar que as siglas *Plane of Array* (POA) e *Global Horizontal Irradiance* (GHI) significam, respetivamente, que o dispositivo em questão está colocado na mesma inclinação dos painéis solares ou que está na horizontal.

Na Figura 3.11 consta uma estação meteorológica montada numa central fotovoltaica pela JdC, equipada com várias componentes listadas na Tabela 3.2, estando eles numerados de um a quatro. O número um representa um albedómetro, o dois um sensor de temperatura, o três um piranómetro POA e o quatro um pluviómetro.

Em certos casos, a central fotovoltaica pode não dispor de uma estação meteorológica, estando os sensores distribuídos pela planta sem uma estrutura física que os interligue. Na Figura 3.12, é possível verificar dois pontos interessantes, primeiro, é possível ver um piranómetro com uma inclinação horizontal (GHI), sendo notável a diferença para a inclinação dos painéis (POA). Ao mesmo tempo, vemos na Figura uma abordagem onde é necessário montar sensores meteorológicos em vez de existir uma estação meteorológica.

Tabela 3.2: Dispositivos típicos de uma estação meterológica.

Componente	Função
Sensor de temperatura para módulos solares	Medir a temperatura dos módulos solares para avaliar o desempenho térmico, uma vez que a temperatura afeta diretamente a eficiência dos painéis.
Sensor de temperatura ambiente	Medir a temperatura ambiente na central, informação essencial para a avaliação da eficiência dos sistemas fotovoltaicos e a análise climática.
Piranómetro (GHI)	Medir a irradiância sobre os módulos fotovoltaicos. Este dispositivo é utilizado como referência para os centros meterológicos, no caso de Portugal, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera [61].
Piranómetro (POA)	Medir a irradiância sobre os módulos fotovoltaicos. Esta componente, com esta inclinação, é particularmente relevante, pelo facto de ser utilizada no cálculo de performance energética da central.
Albedómetro (GHI)	Medir a radiação solar refletida por uma superfície, o que permite determinar o albedo, a razão de radiação solar incidente que é refletida por essa superfície. Esta componente é relevante na situação de estarem instalados painéis bifaciais.
Anemómetro	Medir os valores de velocidade do vento na central, informação crítica para a avaliação do impacto do vento na estrutura dos painéis solares e no sistema de fixação.
Pluviómetro	Registar a quantidade de chuva acumulada na central, permitindo a análise de condições climáticas adversas que podem impactar a operação ou manutenção.



Figura 3.11: Estação meterológica montada numa central fotovoltaica.



Figura 3.12: Piranómetro montado numa central fotovoltaica.

- **Servidor SCADA**

Revisitando a Secção 2.5, o sistema SCADA é estruturado em três conceitos essenciais: o *software* SCADA, a *Human Machine Interface* e o servidor SCADA, este último desempenhando um papel fundamental na supervisão e controlo de uma planta solar.

Quase todas as componentes da central fotovoltaica comunicam, direta ou indiretamente, com o servidor SCADA. Este equipamento constitui o núcleo central do sistema, assegurando o funcionamento das principais funcionalidades, desde a recolha de dados em tempo real até ao controlo remoto e ao processamento de informações.

- **Controladores**

Tendo em conta uma central fotovoltaica, o controlador, tipicamente um *Programmable Logic Controller*, é o dispositivo responsável pela execução de ações de controlo em tempo real e pela monitorização do estado dos elementos da central. O PLC é a interface entre o *software* do SCADA e o equipamento físico da central, sendo responsável pela implementação direta dos comandos de controlo e pela gestão operacional dos equipamentos. Na Figura 3.13, está presente um PLC, em funcionamento, numa central fotovoltaica da JdC, equipado com diversas conexões e capaz de interligar diversos elementos da central. Dependendo da dimensão da central fotovoltaica, o controlador pode integrar um *Power Plant Controller*, ou esta componente pode operar de forma independente do controlador, estando fisicamente separado.

Enquanto o PLC contém os diferentes algoritmos necessários para executar a função de controlo de energia da central, o PPC é desenvolvido para o controlo dinâmico e preciso de uma central fotovoltaica, garantindo a conformidade com o código da rede elétrica, em relação às condições estabelecidas pelo operador de rede, assegurando uma operação eficiente da produção energética da central.

O controlador PPC oferece uma funcionalidade flexível de controlo, sendo que as suas principais funções incluem o controlo da potência ativa e reativa, o controlo do fator de potência, a regulação da tensão e o controlo de potência reativa dependente da tensão, e a limitação da potência aparente.

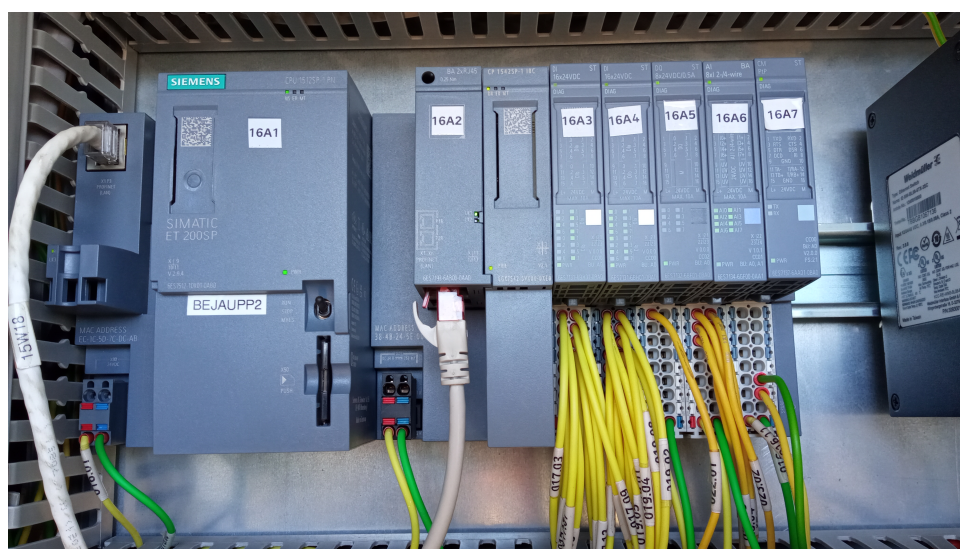


Figura 3.13: PLC montado numa central fotovoltaica.

Como foi referido anteriormente, existem configurações onde a central enquadra componentes específicas tendo em conta as suas necessidades. Posto isto, no caso de existir armazenamento energético na central, é interessante notar que os sistemas BMS e EMS também desempenham o papel de controladores, embora estejam configurados para ações específicas.

Um sistema de gestão de baterias, ou BMS, é projetado para monitorizar e controlar o funcionamento de um conjunto de baterias. A função do BMS inclui o controlo da carga e descarga, a monitorização da tensão e temperatura de cada célula, e a proteção contra sobrecargas ou descargas excessivas, aumentando assim a durabilidade e eficiência do banco de baterias. Já um EMS, é um sistema de gestão de energia, está num nível mais amplo que o BMS, sendo ele responsável pela gestão da energia não só das baterias, mas também a que chega aos inversores através dos painéis solares. O EMS otimiza o fluxo de energia entre a produção e o armazenamento, isto de acordo com a demanda, custos de eletricidade e condições da rede [62].

Por fim, em centrais híbridas, integrando produção eólica, torna-se indispensável a presença de um controlador dedicado à coordenação das duas fontes de produção. Este controlador opera num nível de gestão superior aos restantes da central, assumindo a supervisão geral da produção. A sua função inclui gerir a produção total, priorizando a geração eólica devido à sua menor variabilidade e maior previsibilidade. Além disso, ajusta os níveis de produção para cumprir as exigências da rede e atender às necessidades do cliente, assegurando o respeito pelas restrições técnicas e contratuais.

- **Contadores de Energia**

Os contadores permitem obter valores de energia importada e exportada, produzida e exportada em tempo real que serão, posteriormente, enviados para o controlador de forma a comunicar com o sistema SCADA. Estes dispositivos são essenciais para a monitorização do sistema e permitem a tomada de decisões face ao rendimento do sistema. Posto isto, na Figura 3.14 verifica-se um contador de energia montado numa central solar a encargo da Jayme da Costa.



Figura 3.14: Contador de energia montado numa central fotovoltaica.

Estes contadores elétricos podem estar alojados num quadro de contagem que gere a contagem de energia que passa na subestação, neste quadro está também integrado o sistema de telemetria para enviar os valores das contagens aos serviços centrais do operador de rede. Para este efeito, é necessário um *router* de ligação ao operador, de forma a garantir a comunicação entre os contadores elétricos e os sistemas centrais do operador, permitindo assim o despacho energético.

- **Relé de Interligação**

O relé de proteção, ou de interligação, é o responsável pela monitorização, controlo, proteção e medições da subestação (ou posto de transformação), sendo assim responsável pelo acionamento do disjuntor de interligação da central à rede, no caso de detetar uma falha. Com diversas opções de comunicação e monitorização detalhada, o relé tem funcionalidades avançadas e apresenta um elevado grau de proteção a toda a subestação, conseguindo detetar anomalias de corrente e tensão em todo o seu sistema.

Na Figura 3.15, está presente a vista de fora e de dentro de um relé de proteção, presente numa central fotovoltaica da JdC. À esquerda, encontra-se a porta do quadro de comando, controlo e proteção, onde o relé está situado no centro. À direita, é possível ver o interior do relé de interligação, mostrando as ligações que o constituem.



Figura 3.15: Vistas de um relé de interligação montado numa central fotovoltaica.

3.3 Comunicações ativas da Central Fotovoltaica

Numa central fotovoltaica, o sistema SCADA é projetado de forma a ser capaz de lidar com as necessidades da central e estar preparado para diferentes situações. Para este efeito, o SCADA tem acesso a diversos protocolos de comunicação associados às componentes ativas da central e que, conectados entre si, tornam possível a monitorização, supervisão e controlo da central.

Uma componente ativa é qualquer elemento que envolva uma comunicação direta ou indireta com o SCADA e que influencie a sua operação. Por exemplo, um painel solar não é considerado uma componente ativa, pois não é controlável pelo SCADA, enquanto que o inversor é uma componente ativa, já que a informação que chega ao SCADA provém dos inversores, aos quais o controlador se conecta.

Partindo da Figura 3.3, onde visualizamos a visão geral da central, é necessário conhecer de forma mais detalhada o sistema como um todo, sendo que envolve diversas ligações, não só de carácter elétrico, mas também de comunicação, para que haja conexão entre os diferentes dispositivos nas diferentes etapas.

Na Figura 3.16 estão representadas as comunicações ativas do sistema SCADA numa central fotovoltaica. A cor amarela representa todas as componentes base de uma central, lembrando que os *trackers* não estão incluídos em todas as centrais e que a estação meteorológica pode não existir, sendo substituída por sensores meteorológicos independentes uns dos outros, mas, de qualquer forma, estariam conectados ao controlador. A cor laranja representa as componentes que são específicas a centrais com armazenamento e centrais com hibridização.

Nesta Figura, está descrito que as componentes de campo são todas conectadas ao controlador, antes de comunicar com o sistema SCADA, que recebe e envia informação para o controlador de forma a gerir as componentes ativas. Esta configuração é comum em sistemas SCADA atuais, porém existem situações onde possa não ser feita assim a gestão e controlo do parque. Algumas otimizações a este modelo serão também exploradas no Capítulo 5.

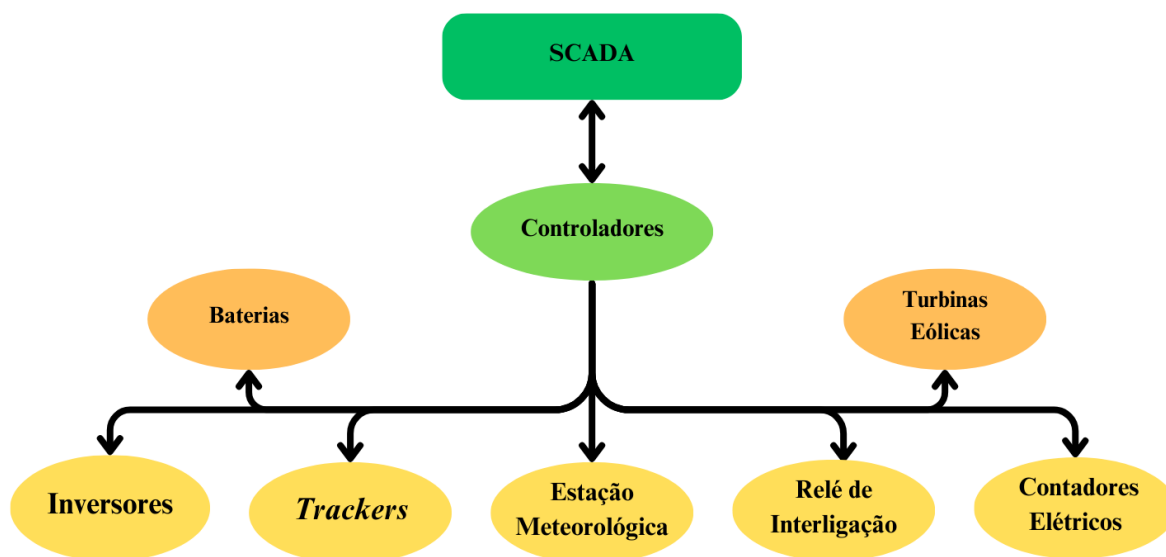


Figura 3.16: Simplificação das comunicações do sistema SCADA na central solar fotovoltaica.

Para compreender a interação entre as diversas componentes de uma rede SCADA, é fundamental entender como estas comunicam entre si na operação de uma central fotovoltaica. Na Tabela 3.3 encontra-se um resumo das arquiteturas de rede em sistemas SCADA, tendo em conta o tipo de rede e a sua descrição. No Capítulo 2, foram expostas estas diferentes tecnologias, que são as mais comuns para a interligação de componentes neste tipo de sistemas.

Tabela 3.3: Resumo das arquiteturas de rede em sistemas SCADA.

Tipo de Rede	Descrição
Redes Cabladas	As redes cabladas são utilizadas devido à sua elevada confiabilidade, segurança e resistência a interferências externas, essenciais em ambientes industriais.
Comunicação em Série	As comunicações em série são usadas para distâncias curtas a médias, sendo a tecnologia <i>RS-485</i> ideal para múltiplos dispositivos e distâncias maiores.
Comunicação <i>Ethernet</i>	A tecnologia <i>Ethernet</i> oferece alta velocidade de transmissão e compatibilidade com protocolos TCP/IP, sendo amplamente usada em redes locais industriais.
Comunicação por Fibra Ótica	A fibra ótica, com alta largura de banda e imunidade a interferências, é usada para interligar dispositivos em longas distâncias, oferecendo maior alcance e confiabilidade.
Redes sem Fio	As redes sem fio proporcionam flexibilidade e mobilidade, sendo adequadas para locais onde a instalação de cabos é impraticável ou difícil.
<i>Wi-Fi</i>	Usado extensamente em redes locais, o <i>Wi-Fi</i> oferece maior largura de banda em comparação com o <i>LoRa</i> ou o <i>Zigbee</i> , mas é limitado por alcance e estabilidade em ambientes industriais.
<i>Zigbee</i>	O <i>Zigbee</i> é ideal para comunicações de curto alcance com baixo consumo de energia, sendo amplamente usado em redes de malha.
<i>LoRa</i>	<i>LoRa</i> é uma tecnologia de longo alcance e baixo consumo, adequada para transmissão de dados em áreas remotas e oferecendo capacidades de controlo e monitorização inteligente.
<i>4G/5G</i>	As tecnologias <i>4G</i> e <i>5G</i> representam as gerações mais recentes da rede móvel, sendo tecnologias eficazes para monitorização remota e controlo em tempo real, com alta capacidade de transmissão de dados e baixa latência.

No entanto, para além do meio físico, é de extrema importância conhecer os protocolos de comunicação utilizados por estas componentes, de forma a garantir a comunicação entre elas e com o sistema SCADA. Desta forma, de seguida, são apresentados os principais protocolos de comunicação em sistemas SCADA, no contexto da geração de energia solar.

- **Modbus**

O *Modbus* é um protocolo de comunicação amplamente utilizado em sistemas de automação industrial. Ele permite a comunicação entre dispositivos eletrónicos, como controladores, sensores e atuadores, facilitando a troca de dados e o controlo de processos.

A arquitetura do protocolo *Modbus* baseia-se numa estrutura de mensagens simples e coerente, independentemente do tipo de interface física utilizada. Esta flexibilidade permite que o mesmo protocolo seja utilizado em diferentes tipos de conexões, como *RS-232*, *RS-485* ou *Ethernet* [36].

Cada mensagem *Modbus* inclui quatro elementos básicos: endereço do dispositivo, função, dados e código de verificação de erros. Esta consistência facilita a análise e a depuração das comunicações, melhorando a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes.

A sua simplicidade, robustez e flexibilidade fazem do *Modbus* um dos protocolos mais populares na indústria [34]. O *Modbus* é um protocolo extenso, tendo várias variantes de onde se destacam as seguintes para a utilização em sistemas SCADA:

- **Modbus RTU**

O *Modbus RTU* é uma versão do protocolo *Modbus* que opera em série, normalmente conectando via *RS-485*, podendo ser também utilizado o *RS-232*, mas era mais comum antigamente. Este protocolo é usado na camada de ligação de dados do Modelo OSI e é mais comum em sistemas de comunicação locais entre dispositivos [34].

Este protocolo utiliza uma hierarquia *Master/Slave*, onde um dispositivo mestre controla a comunicação com diversos escravos, cada um sendo identificado por um endereço único. O mestre envia mensagens que incluem o endereço do escravo destinatário, e os escravos respondem apenas se reconhecerem o seu próprio endereço.

- **Modbus ASCII**

O *Modbus ASCII* é outra variante do *Modbus* que utiliza um formato de transmissão baseado em caracteres ASCII. Enquanto que o *Modbus RTU* usa um formato binário para transmitir dados, o *Modbus ASCII* transmite os dados em forma de caracteres legíveis.

Esta variante pode ser útil em comunicações em série, especialmente em situações onde a legibilidade humana dos dados é importante para a manutenção ou para o diagnóstico do sistema industrial. Em contrapartida, comparativamente ao *Modbus RTU*, o processo é mais lento, sendo este protocolo utilizado apenas quando a legibilidade dos dados for essencial [63].

- **Modbus TCP/IP**

O *Modbus TCP/IP* é uma variante do protocolo *Modbus*, sendo capaz de funcionar sobre o protocolo TCP/IP, permitindo assim que dispositivos SCADA comuniquem através de redes *Ethernet*, tirando proveito das características de fiabilidade e de verificação de erros do protocolo TCP.

Esta variante é mais recente e é bastante mais poderosa que as anteriores, visto que pode ser utilizada em redes de longa distância com topologias complexas e permite a comunicação entre vários dispositivos, sendo bastante rápida na execução de tarefas [34].

Para além destas vantagens, esta variante do *Modbus* utiliza uma hierarquia de comunicação *Client-Server*, tornando-o mais adaptado às redes industriais modernas e aumentando a sua eficiência em diversos parâmetros.

- ***Distributed Network Protocol 3***

O protocolo *Distributed Network Protocol 3* (DNP3) é um padrão de telecomunicações usado para definir comunicações entre o servidor SCADA, os controladores e os dispositivos de campo, sendo utilizado, especialmente, no continente americano [64]. Este protocolo é particularmente útil devido à sua eficiência no envio de pacotes de dados pequenos e no sequenciamento das mensagens, o que o torna mais fiável para controlo em tempo real.

O DNP3 destaca-se por suportar diversas arquiteturas de comunicação, sendo relevante mencionar a sua capacidade de utilizar uma arquitetura de comunicações em repouso, ou *Publish-Subscribe*, além do padrão *Request-Response* [10]. Este protocolo permite a comunicação entre múltiplas MTUs, quando aplicado numa hierarquia *Master-Slave* [64], mas também é capaz de operar em P2P.

Além disso, o DNP3 foi otimizado para sistemas SCADA que utilizam previamente protocolos baseados em TCP/IP, sendo também configurável no modelo *Client-Server*. Sendo um protocolo aberto, torna-se ideal para integração em redes já existentes [64, 65].

Por fim, o DNP3 inclui um sistema de certificação de conformidade que assegura níveis de funcionalidade, promovendo a interoperabilidade e facilitando a expansão e manutenção de sistemas ao longo do tempo [10].

- ***International Electrotechnical Commission 104***

O protocolo *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61870-5-104, geralmente definido como IEC 104, é uma variante do conjunto de protocolos IEC 61870-5, sendo utilizado, especificamente, para a troca de informações de telecontrolo entre sistemas de controlo e dispositivos em instalações eléctricas.

Este protocolo desempenha um papel fundamental em sistemas SCADA, pois permite a comunicação eficiente e segura entre os equipamentos de campo e a central de controlo, utilizando redes *Ethernet* através dos protocolos TCP/IP [10].

O protocolo foi projetado para transmitir dados críticos, em tempo real, o que é essencial para monitorizar e controlar operações em infraestruturas de energia, onde atrasos podem impactar a segurança e a eficiência da rede.

Além disso, o IEC 104 utiliza mecanismos de sincronização e controlo de fluxo que melhoram a fiabilidade da comunicação, podendo também incorporar medidas de segurança adicionais para proteger contra acessos não autorizados e falhas. Este protocolo é compatível com uma variedade de dispositivos e permite comunicações bidirecionais, onde o centro de controlo pode tanto receber dados quanto enviar comandos de controlo [66].

- ***International Electrotechnical Commission 61850***

O protocolo IEC 61850 foi criado para padronizar a comunicação em sistemas de automação e controlo em subestações eléctricas, com o objetivo de melhorar a interoperabilidade entre diferentes dispositivos e sistemas de diversos fabricantes. Este protocolo foi desenvolvido pela *International Electrotechnical Commission* entre o fim da década de 1990 e o início dos anos 2000 [34].

Este protocolo é amplamente utilizado em sistemas SCADA, onde as suas operações requerem um elevado nível de fiabilidade e segurança [64]. Uma das principais características do IEC 61850 é a sua estrutura de comunicação, que permite a troca de dados complexos em alta velocidade, possibilitando assim uma coordenação e controlo precisos dos dispositivos de uma subestação, o que é essencial para garantir a continuidade e a segurança das operações [65].

- ***Profibus / Profinet***

O *Profibus* é um protocolo de comunicação desenvolvido por um consórcio de empresas, com a *Siemens* a desempenhar um papel fundamental no seu desenvolvimento. Inicialmente, o *Profibus* foi projetado para ser utilizado em componentes fabricados pelas empresas envolvidas, mas com o tempo tornou-se um protocolo amplamente adotado, embora continue associado às suas fundadoras.

Mesmo que tenha sido desenvolvido como um padrão aberto, o *Profibus* ainda mantém uma forte ligação ao ecossistema da *Siemens*, que detém uma significativa quota de mercado, especialmente em sistemas de automação industrial [67, 68].

Com o avanço das tecnologias e a crescente demanda por maior velocidade de comunicação e flexibilidade, surgiu o *Profinet*, uma evolução do *Profibus*. O *Profinet* baseia-se em *Ethernet*, o que lhe confere uma maior capacidade de largura de banda e escalabilidade, permitindo integrar dispositivos e sistemas mais complexos com uma comunicação mais eficiente [69].

Embora o *Profinet* ofereça vantagens significativas em termos de desempenho, diagnóstico avançado e integração com redes *Internet*, ele ainda fica atrás do *Modbus* em termos de popularidade, principalmente em aplicações de menor escala ou sistemas que exigem maior simplicidade na comunicação.

- ***Device Language Message Specification***

O protocolo *Device Language Message Specification* (DLMS) é um *standard* utilizado, globalmente, para a comunicação em sistemas de medição inteligente de energia. A sua principal função é permitir a troca de dados entre dispositivos de medição e sistemas de controlo, transformando os dados recolhidos em mensagens estruturadas para facilitar a comunicação. A sua importância reside na padronização da comunicação entre dispositivos de diferentes fabricantes, permitindo uma interoperabilidade eficiente. A adoção do DLMS em sistemas de medição inteligente garante a consistência e a fiabilidade dos dados transmitidos, essencial para a gestão e controlo eficiente dos recursos energéticos, além de facilitar a integração com outros sistemas e plataformas de gestão [70].

No contexto da comunicação entre as componentes do sistema SCADA, deve-se ter em conta também duas formas de comunicação mais simples, mas amplamente utilizadas, que não se enquadram nestas definições de meio físico e protocolo de comunicação. Na comunicação, usa-se também comunicação através de sinais analógicos e digitais.

Os sinais analógicos transmitem grandezas físicas contínuas, como a temperatura ou a irradiância solar, utilizando variáveis de tensão, como o padrão 0 – 10V, ou variáveis de corrente, como o padrão 4 – 20mA. Já os sinais digitais, como os contactos secos, transmitem informações binárias, sendo frequentemente utilizados para indicar estados discretos, como alarmes ou condições de operação. Embora menos sofisticados, estes métodos de comunicação são essenciais em determinadas funções do SCADA, pela sua simplicidade, robustez e fiabilidade.

Posto isto, e tendo em conta as soluções mais comuns utilizadas em sistemas SCADA e partindo da Figura 3.16, com o intuito de ilustrar de forma mais específica a arquitetura de comunicações de uma central fotovoltaica genérica, podemos verificar o Anexo B referente a uma central genérica do tipo UPP com apenas um posto de transformação.

Neste Anexo, observa-se uma central com 4 inversores de *string* conectados através de uma *ComBox* a um *switch* que é, de seguida, ligado ao controlador PLC. Ao mesmo tempo, nesta configuração os painéis estão montados sobre *trackers*, como tal o controlador está conectado ao seu sistema de controlo e gestão. Conseguimos também visualizar uma configuração onde existe um servidor SCADA que reside num PC industrial independente. Podemos ainda verificar que é uma configuração sem estação meteorológica, estando os sensores diretamente ligados ao controlador, e que os painéis utilizados nesta central são bifaciais, devido à existência de um albedómetro. Em relação à forma como o sistema comunica entre si, podemos verificar que esta configuração utiliza, essencialmente, os protocolos de comunicação *Modbus RTU* e *Modbus TCP/IP*. Ainda relativamente à comunicação, estão presentes dois *routers* distintos, um conecta a central à *Internet*, já o outro cria a comunicação com o operador de rede, neste caso a E-Redes.

Seguidamente, havendo uma melhor compreensão do conceito de arquitetura de comunicações, são apresentadas as componentes ativas de uma central fotovoltaica, com ênfase na interação entre estas e o controlador da planta solar, bem como com o sistema SCADA, responsável pela sua supervisão. A análise inclui a descrição dos protocolos de comunicação e dos meios físicos mais comumente utilizados na integração dessas componentes, abordando também, quando necessário, o uso de sinais digitais ou analógicos.

Nesta análise, é relevante notar que as configurações aqui descritas refletem as práticas adotadas pela Jayme da Costa, servindo como um exemplo comum na indústria. Contudo, é importante reconhecer que existem diversas abordagens para interligar os elementos da central fotovoltaica ao controlador e ao servidor SCADA. A configuração apresentada foca-se, especificamente, nas soluções empregues pela empresa, proporcionando uma visão prática e alinhada com os padrões industriais.

• Servidor SCADA

O servidor SCADA, tendo em conta que tem de comunicar com diversas componentes, deve estar equipado com entradas e saídas capazes de comunicar em diversos protocolos, caso haja necessidade de se adaptar a componentes que só comuniquem de forma específica. Sendo assim, o servidor SCADA está equipado com comunicação em série *RS-485* e comunicação *Ethernet*, e comunica com os mais diversos protocolos, desde os mais comuns como o *Modbus RTU* e o *Modbus TCP/IP*, aos mais específicos como o IEC 61850 e o *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA), sendo um protocolo mais direccionado para sistemas SCADA mais modernos, a ser explorado no Capítulo 5. Posto isto, na Tabela 3.4 podemos verificar a informação relativamente à comunicação de forma mais estruturada.

- **Controladores**

O controlador associado ao sistema SCADA de uma central fotovoltaica, geralmente um PLC ou um PPC, constitui o núcleo de toda a operação, sendo o ponto central onde todas as componentes são interligados. Este pode receber comunicações diretamente dos dispositivos ou através de *switches*. Habitualmente, a comunicação é estabelecida utilizando os protocolos *Modbus* TCP/IP e IEC 104, com cabos *Ethernet RJ-45*.

No caso de centrais que integram energia eólica, o respetivo controlador associado à produção híbrida deve comunicar com o sistema SCADA por meio de *Modbus* TCP/IP ou IEC 104, igualmente através de cabos *Ethernet RJ-45*. Por outro lado, em instalações que incluem sistemas de armazenamento de energia, os dispositivos responsáveis pelo controlo e gestão desses sistemas são geralmente conectados ao SCADA utilizando o protocolo *Modbus* TCP/IP via cabos *Ethernet RJ-45*. Este cenário é o mais comum. Em ambas as situações, destaca-se que os sistemas mais recentes têm adotado o protocolo *OPC UA*, que oferece vantagens em termos de eficiência e flexibilidade quando comparado com o *Modbus*. Assim, considerando estas especificações, a Tabela 3.5 apresenta informações gerais sobre as comunicações dos controladores do sistema SCADA, abrangendo a diversidade de operações realizadas em diferentes contextos, de acordo com as várias práticas aplicadas.

- **Inversores**

Os inversores são uma componente essencial para o sistema SCADA e, como foi referido na Secção 3.2, dependendo da central, podem ser centralizados ou descentralizados (de *string*), sendo que os últimos têm a possibilidade de estarem ligados a uma *ComBox* antes de serem conectados ao controlador da central fotovoltaica. No caso dos inversores de *string* sem *ComBox*, estes devem conectar-se ao SCADA através do protocolo *Modbus* RTU via cabo em série *RS-485*. Já no caso da central estar instalada com inversores centralizados, ou de estar equipada com inversores de *string* via *ComBox*, é necessária a conexão através de *Modbus* TCP/IP via *Ethernet RJ-45*.

- **Trackers**

Os *trackers* numa central fotovoltaica são opcionais e dependem do projeto elétrico. No entanto, no caso de existirem, estes devem ser capazes de alterar a posição dos módulos solares para garantir a sua maior eficiência. Para que haja comunicação entre os *trackers* e o sistema SCADA, é necessário que o SCADA comunique com um sistema centralizado de gestão dos *trackers*, através de *Modbus* TCP/IP ou do protocolo *OPC UA*, utilizando uma rede *Ethernet RJ-45*.

- **Estação Meteorológica**

A colheita de dados meteorológicos é de extrema relevância para a constante análise da planta solar, podendo informar o sistema SCADA sobre o estado em tempo real da central. No caso de existir uma estação meteorológica, é necessário que esta se comunique com o SCADA via *Modbus* TCP/IP através de *Ethernet RJ-45*, sendo conectada ao controlador do sistema, que se comunica com o SCADA.

- **Sensores Meteorológicos**

No caso de não existir estação meteorológica, e os sensores atmosféricos forem independentes, estes podem ser ligados ao controlador através de *Modbus* RTU com comunicação em série *RS-485* ou, alternativamente, por meio de sinais analógicos de corrente, utilizando o padrão 4 – 20mA.

- **Relé de Interligação**

Em relação ao relé de proteção, existem vários protocolos capazes de criar a ligação até ao sistema SCADA, sendo estes o *Modbus TCP/IP*, IEC 104 e o IEC 61850 através de *Ethernet RJ-45*. É também possível que haja a ligação ao PLC via sinais digitais através de contactos secos.

- **Contadores de Energia**

Os contadores são uma componente de extrema importância para o SCADA. De forma a tornar viável a comunicação entre o PLC e o contador, é necessário haver um conversor do protocolo de *Modbus TCP/IP* para outro protocolo indicado para esta componente, o protocolo DLMS. Este conversor de protocolo, ou *gateway*, deve ser capaz de comunicar via *Ethernet RJ-45* e utilizar o protocolo *Modbus TCP/IP*, conectando-se posteriormente ao controlador. Já a comunicação entre o conversor e o contador deve ser feita a partir de comunicação em série *RS-485*, utilizando o protocolo de comunicação DLMS.

Tendo em conta as componentes críticas e a forma como estas se comunicam com o sistema, apresentam-se, de seguida, as Tabelas 3.4 e 3.5, que descrevem as especificações do servidor SCADA e dos controladores, sendo componentes que exigem maior nível de detalhe.

Tabela 3.4: Requisitos operacionais do servidor SCADA.

Categoria	Especificações
Interfaces I/O	• Meio Físico: <i>Ethernet RJ-45</i>, • Outras: Comunicação em série <i>RS-485</i>. • Entradas digitais: Mínimo de 8 (escalável). • Saídas digitais: Até 8 (escalável). • Sinais analógicos: Até 8 (escalável) (sinais de corrente e/ou tensão).
Protocolos suportados	<i>Modbus TCP/IP, Modbus RTU, IEC 104, IEC 61850, OPC UA, DNP3, Profibus, Profinet.</i>

Tabela 3.5: Requisitos operacionais dos controladores.

Categoria	Especificações
Interfaces I/O	• Meio Físico: <i>Ethernet RJ-45</i>. • Entradas digitais: Mínimo de 8 (escalável). • Saídas digitais: Até 8 (escalável). • Sinais analógicos: Até 8 (escalável) (sinais de corrente e/ou tensão).
Protocolos suportados	<i>Modbus TCP/IP, IEC 104, IEC 61850, OPC UA, DNP3, Profinet.</i>

Capítulo 4

Exigências do Sistema SCADA aplicado a Centrais Fotovoltaicas

Neste Capítulo, são descritos os requisitos essenciais para garantir que um sistema SCADA esteja devidamente preparado para operar de forma eficaz numa central fotovoltaica. Estes requisitos abrangem aspetos funcionais e não funcionais, englobando diversos tópicos que visam definir as funcionalidades e necessidades de um sistema SCADA aplicado na produção de energia solar.

4.1 Requisitos Funcionais do Sistema SCADA

O sistema SCADA tem como objetivo proporcionar capacidades de monitorização, supervisão e controlo aplicadas a processos industriais, como é o caso de uma central fotovoltaica. Este sistema deve permitir a supervisão da central através de uma arquitetura distribuída, suportando tanto a gestão remota como local. Além disso, deve facultar aos utilizadores uma visão detalhada do desempenho global da central, bem como informações específicas sobre os seus diversos equipamentos, o que é fundamental para garantir uma operação eficiente e segura. Estas funcionalidades são a base do sistema SCADA, sendo que nesta Secção 4.1 são exploradas a fundo, tendo em consideração as necessidades específicas de uma central fotovoltaica.

É importante destacar que o sistema SCADA deve ser orientado para o cliente, tendo em consideração as suas exigências, expectativas e necessidades. A adaptação do sistema às características da central fotovoltaica permite uma gestão mais eficaz e uma maior capacidade de resposta a possíveis falhas ou anomalias, contribuindo assim para a maximização da produção de energia e a minimização de tempos de inatividade. Tendo tudo isto em mente, de seguida apresentam-se os requisitos funcionais que o sistema SCADA deve atender, começando pela visualização do mesmo, através da sua interface, permitindo a interação com o utilizador.

- **Visualização do Sistema**

O SCADA deve incluir uma interface própria que permita a supervisão e o controlo remoto da central fotovoltaica, oferecendo acesso à informação em tempo real, a dados históricos sobre a produção energética e às componentes da central.

A aplicação deve apresentar gráficos de desempenho, indicadores de performance e do estado das componentes críticas, além de alarmes programáveis, avisos de manutenção, entre outras funcionalidades.

De forma a facilitar o processo, o sistema pode oferecer acesso remoto por meio de um *web-access browser*, como o *Google Chrome*, o *Mozilla Firefox* ou o *Microsoft Edge*, e deve ser adaptável a diversos dispositivos móveis, como telemóveis, *tablets*, computadores fixos ou *laptops*. Opcionalmente, pode também existir o acesso local através de uma HMI localizada na própria central.

A interface do sistema SCADA deve ser fácil de operar tanto para utilizadores técnicos como não técnicos, exigindo formação mínima. Esta interface, essencialmente, deve ser intuitiva, permitindo ao operador uma navegação clara e uma visualização precisa dos dados da planta, funcionando como uma ponte entre a central e o operador.

- **Monitorização em Tempo Real**

O sistema SCADA deve fornecer monitorização em tempo real dos parâmetros-chave, como o desempenho e a disponibilidade da central fotovoltaica, bem como das condições ambientais no local. Além disso, deve ser capaz de reconhecer o estado atual do sistema e, consequentemente, das componentes críticas da central solar.

A interface do sistema SCADA deve ser capaz de exibir, em tempo real, informações de forma gráfica e textual, tanto sobre a geração energética da central como sobre os equipamentos que a ela pertencem. Para este efeito, são utilizados indicadores de performance e indicadores de estado associados às componentes críticas.

Os indicadores de performance estão relacionados aos parâmetros-chave da central, podendo ser representadas por meio de *widgets* de texto ou indicadores visuais, como gráficos ou desenhos. Um *Key Performance Indicator* (KPI) é responsável por fornecer informações relevantes no âmbito da planta solar, posto isto, há diversos parâmetros críticos a ter em conta no funcionamento de uma central fotovoltaica, sendo que traduzem a sua eficiência, fiabilidade e segurança. A Tabela 4.1 resume os KPIs mais relevantes a ter em conta numa central solar genérica.

Tabela 4.1: Indicadores de performance típicos numa central fotovoltaica.

Parâmetro	Unidades
<i>Performance Ratio</i>	%
Potência gerada pelos inversores	<i>kW</i>
Potência de interligação da central	<i>kW</i>
Energia gerada pelos inversores	<i>kWh</i>
Energia produzida, medida nos contadores elétricos	<i>kWh</i>
Irradiância solar incidente	W/m^2
Disponibilidade da central	%

– Performance Ratio

Este índice é amplamente utilizado na análise de centrais fotovoltaicas, sendo considerado um dos mais relevantes na avaliação da eficiência de uma planta solar. O *Performance Ratio* (PR) expressa a relação entre a energia produzida pela central e o valor teórico da produção energética, sem ter em conta as perdas do sistema, ambos em kWh [71]. A Equação 4.1 apresenta o cálculo deste índice em percentagem (%).

$$PR = \frac{E_{\text{total real}}}{E_{\text{total teórica}}} \times 100 \quad (4.1)$$

O PR pode ser afetado por diversos fatores que impactam a produção de energia, como sombreamento nos módulos solares, sujidade acumulada, e condições climáticas adversas, como pólen, neve e poeiras. Esses fatores podem interromper ou retardar a produção de energia.

Além disso, as perdas do sistema influenciam diretamente o PR. Essas perdas podem ocorrer devido ao sobreaquecimento das componentes, perdas nos cabos de transmissão, ou outros fatores técnicos, como a degradação temporal dos módulos solares ou dos inversores, que resultam em uma redução no seu rendimento ao longo do tempo [72].

– Potência Produzida pela Central Fotovoltaica

A potência total gerada pela central fotovoltaica é um indicador fundamental para avaliar a capacidade imediata do sistema. Refere-se à taxa de geração de energia num momento específico e é expressa em kW. Este valor é calculado pela Equação 4.2, onde P_i representa a potência fornecida ao inversor i e n é o número total de inversores.

Em relação a esta Equação, é necessário ter em conta que a Equação não considera as perdas do sistema, sendo apenas o valor esperado de potência, podendo também se calculado em outros pontos do sistema sem ser os inversores, porém sendo mais comum assim. Em relação a este KPI é relevante ter em conta que é aplicável não só à potência de saída dos inversores, mas também à potência que é esperada de chegar aos inversores, tendo em conta a corrente que atravessa os módulos solares e à potência que chega ao relé de interligação.

$$P_{\text{total teórica}} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4.2)$$

Esta métrica é importante para avaliar a capacidade da central de responder a picos de demanda, já que mostra a taxa instantânea de geração. Contudo, por si só, não revela a quantidade total de energia produzida ao longo do tempo, sendo essencial para entender a capacidade máxima de geração e a carga que o sistema pode suportar em tempo real.

– Energia Produzida pela Central Fotovoltaica

A energia total gerada pela central fotovoltaica é um parâmetro crítico para medir o desempenho global do sistema ao longo do tempo. Esta métrica é, geralmente, expressa em kWh e refere-se à quantidade de energia gerada durante um período específico. A Equação 4.3 expressa a energia gerada, a partir da Equação 4.2, onde P_i representa a potência fornecida ao inversor i , n é o número total de inversores e t' a variável de integração no intervalo de tempo t_0 a t , todos em horas.

$$E_{\text{total teórica}} = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n P_i(t'), dt' \quad (4.3)$$

Tal como a Equação 4.2, a Equação 4.3 também não considera as perdas do sistema, sendo um cálculo teórico que representa a produção de energia esperada pela central fotovoltaica. Este valor assume que o sistema opera em condições ideais, sem perdas decorrentes de fatores como resistência nos cabos, perdas térmicas ou degradação de componentes.

A produção de energia é crucial para avaliar a eficiência global da central, uma vez que leva em consideração as variações nas condições de geração, como a intensidade solar e o tempo de operação. Este parâmetro é de extrema importância para fins de contabilização e faturação, já que reflete a contribuição da central para o fornecimento de energia à rede ao longo do tempo.

Adicionalmente, a produção de energia pode ser calculada em vários pontos da central fotovoltaica, como os inversores, os contadores elétricos e os módulos solares, fornecendo uma visão detalhada da geração de energia em diferentes pontos do processo de conversão e transmissão. Cada um desses pontos pode ter valores ligeiramente diferentes, dependendo das características específicas de operação e medição em cada componente do sistema.

– Disponibilidade da Central Fotovoltaica

A disponibilidade de uma central fotovoltaica refere-se ao tempo em que o sistema está operacional e capaz de gerar energia. A Equação 4.4 descreve a disponibilidade da central, em percentagem (%), onde $t_{\text{operação}}$ é o tempo em que a central está efetivamente a produzir energia, e t_{total} é o tempo total considerado para a análise, ambos em horas, sendo o intervalo de tempo selecionado na plataforma SCADA. O valor de t_{total} pode incluir períodos em que a central não está em operação, como momentos de manutenção ou falhas, sendo fundamental para o cálculo da eficiência operacional do sistema.

$$D = \frac{t_{\text{operação}}}{t_{\text{total}}} \times 100 \quad (4.4)$$

A disponibilidade da central depende sempre do projeto em questão e deve ser estabelecida como critério em contrato com o cliente. Esta pode ser medida em diferentes pontos do sistema, como no relé, nos inversores ou nos painéis, sendo mais ou menos criterioso.

No que toca à monitorização em tempo real de uma central fotovoltaica, para além dos KPIs, é relevante abordar os indicadores de estado. A aplicação associada ao SCADA deve apresentar informações de várias componentes do sistema que mostrem a sua condição em tempo real. Entre os diversos indicadores devem constar erros nos equipamentos e o estado atual dos mesmos. Posto isto, na Tabela 4.2, apresentam-se algumas das componentes e como o seu estado pode ser definido na interface do SCADA.

Tabela 4.2: Indicadores de estado típicos de uma central fotovoltaica.

Componente	Estado	Informações
Inversores	Ativo, inativo ou em falha.	Valores de tensão, potência, corrente e temperatura.
Sensores Meteorológicos	Operacional, inativo ou em falha.	Valores obtidos pelos sensores: radiação solar, velocidade do vento, entre outros.
Trackers	Operacional, inativo, em segurança ou em falha.	Ângulo de inclinação e alarmes associados.
Baterias	A carregar, a descarregar, em espera ou em manutenção.	Porcentagem de energia disponível, estado de saúde, valores de tensão, corrente, potência e temperatura.

Neste contexto da monitorização, a visualização do *layout* geográfico da central é uma prática vantajosa, permitindo monitorizar o estado dos equipamentos e utilizar um código de cores para representar diferentes condições operacionais. A Figura 4.1 apresenta o *layout* da distribuição dos inversores numa central fotovoltaica, localizada em Tondela, a encargo da Jayme da Costa, no dia 26 de Dezembro de 2024. Esta Figura 4.1 ilustra todos os inversores e as respetivas áreas de módulos solares sob a sua responsabilidade.

Nesta Figura, relativamente à área de módulos solares associada a cada inversor, a cor verde indica que todas as *strings* possuem correntes idênticas e que os inversores estão a operar normalmente. A cor amarela sugere que há *strings* com menos de 20% de produção em comparação com outras *strings* do mesmo inversor. Por sua vez, a cor vermelha sinaliza *strings* com correntes inferiores a 40% relativamente a outras *strings* do mesmo inversor.

Quanto às cores atribuídas aos próprios inversores, a cor verde significa que o equipamento está totalmente operacional. O amarelo indica a existência de algum alarme não prioritário, enquanto o vermelho representa a ocorrência de um alarme mais crítico no inversor.

Figura 4.1: *Layout* geográfico da central fotovoltaica de Tondela.

Por fim, ainda no âmbito da monitorização em tempo real, pode verificar-se a Figura 4.2, onde se encontra presente a vista geral da central fotovoltaica de Tondela, no dia 26 de dezembro de 2024, sendo esta a página inicial da interface do sistema SCADA em questão. Nesta Figura, podemos observar de forma mais destacada três KPIs principais, sendo estes o PR, a potência de saída da central e a radiação solar, todos os valores em tempo real.

Tendo em conta que esta central é dividida em quatro UPPs, o valor do PR é calculado a partir da média dos PRs individuais de cada UPP. Já o valor da radiação solar é obtido a partir da média entre as medições adquiridas a partir de dois piranómetros POA.

Podemos ainda verificar, do lado esquerdo, dados meteorológicos provenientes da estação meteorológica e ainda gráficos da potência ativa gerada no dia presente e da energia gerada pela central no mês de dezembro. Por fim, é possível observar outros valores de forma mais distribuída, permitindo assim analisar a performance de cada uma das UPPs separadamente.

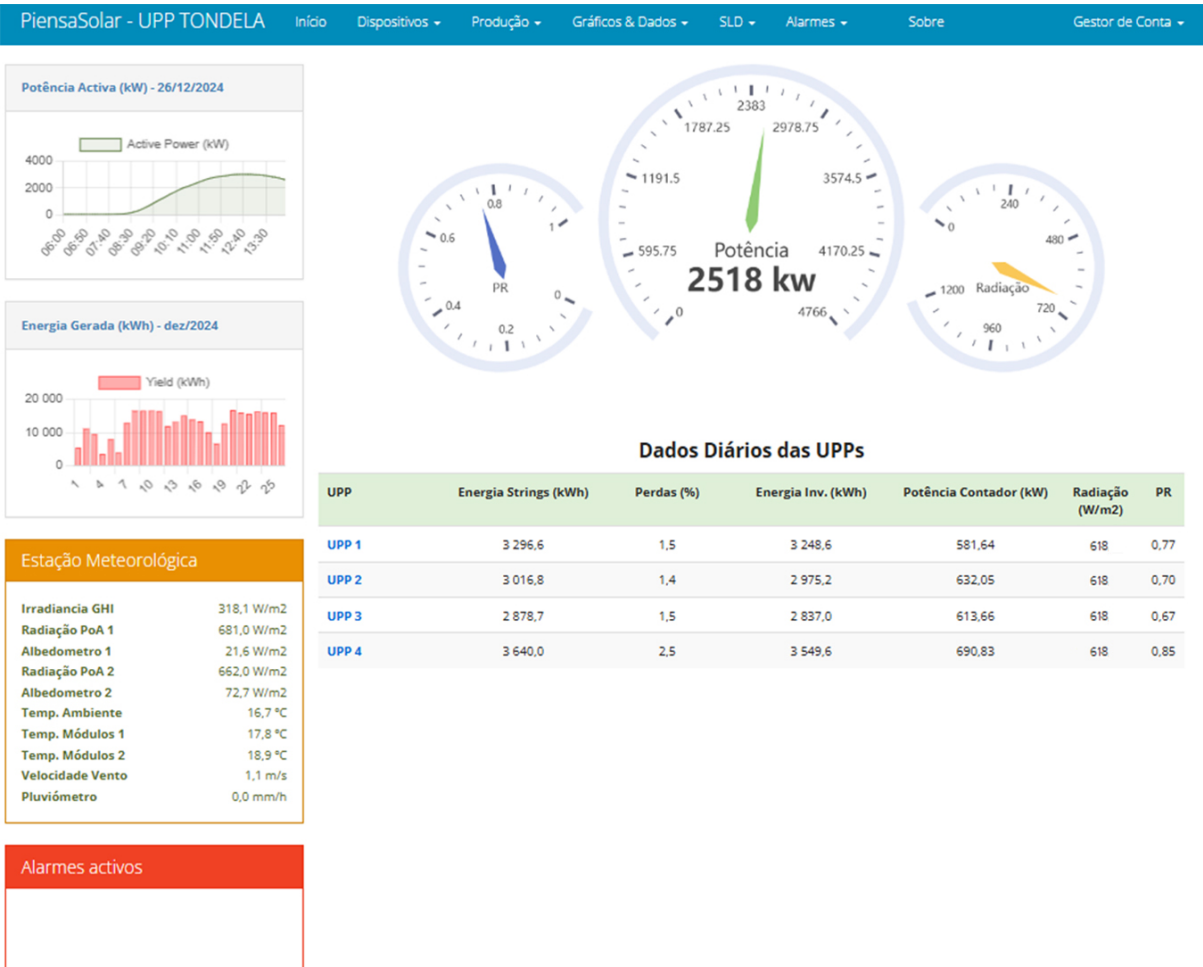


Figura 4.2: Vista geral da central fotovoltaica de Tondela.

• Registo de Dados

O SCADA tem que ser capaz de registar dados em intervalos configuráveis e armazená-los numa base de dados segura e escalável. O registo de dados deve incluir informações históricas para fins de análise e geração de relatórios.

Deverá existir, na interface SCADA, uma página de dados históricos com o objetivo de fornecer acesso a informações sobre as diferentes variáveis da central num intervalo de tempo específico. Na apresentação dos dados, deverá haver a opção de selecionar intervalos predefinidos (últimas 24 horas, última semana, último mês) ou intervalos de datas personalizados, e os resultados têm que ser posteriormente exportados, geralmente em *Microsoft Excel*, ou em ficheiros *Comma-separated Values* (CSV) ou em *Portable Document Format* (PDF).

Nas Figuras 4.3 e 4.4 estão representados diferentes dados relativos a uma central fotovoltaica localizada em Serpa, a encargo da Jayme da Costa. Na Figura 4.3 está representada a produção energética ao longo do mês de julho de 2024, e na Figura 4.4 está representada a produção anual. Nestas Figuras é possível observar a produção energética com mais detalhe e de forma cronológica. Ao mesmo tempo, é possível analisar a performance da central ao longo do tempo e avaliar as perdas entre os inversores e os contadores elétricos.

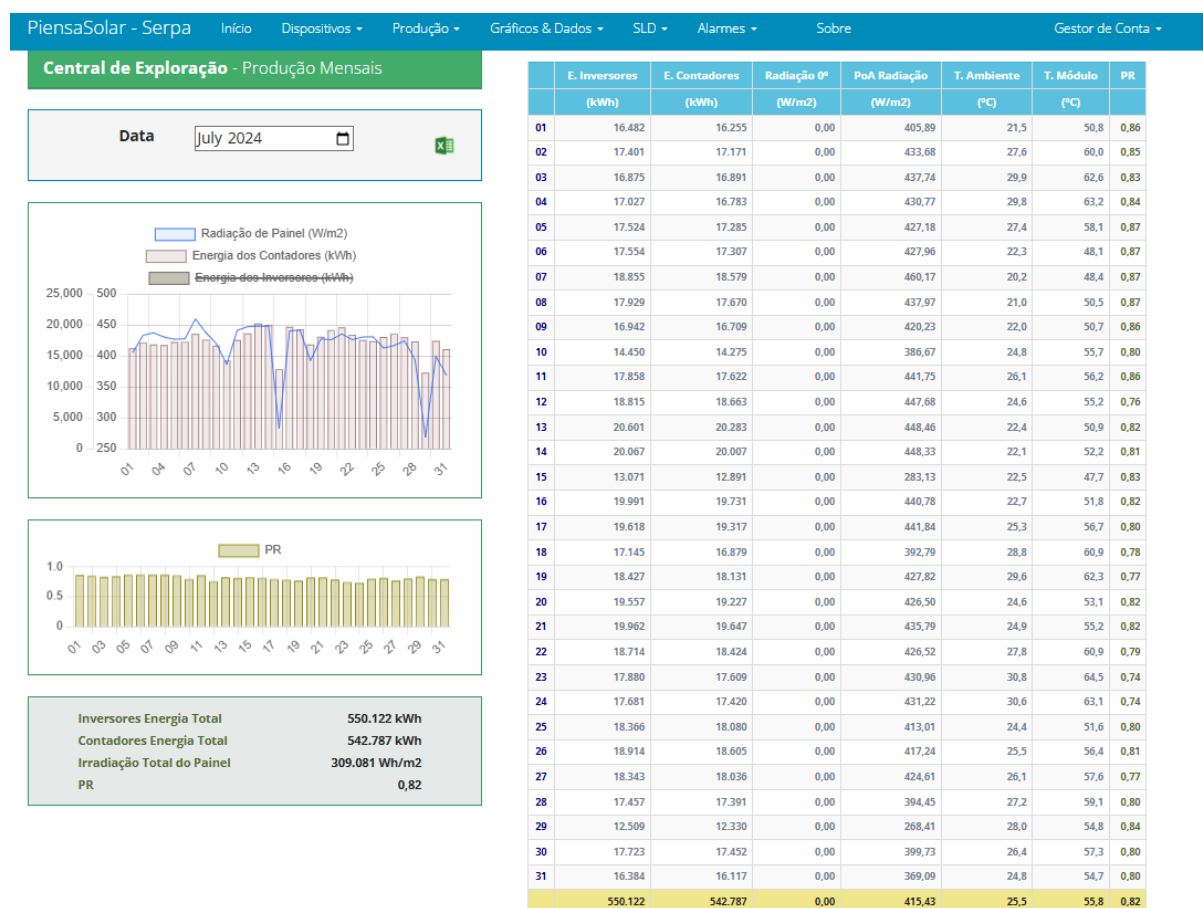


Figura 4.3: Produção no mês de julho da central fotovoltaica de Serpa.

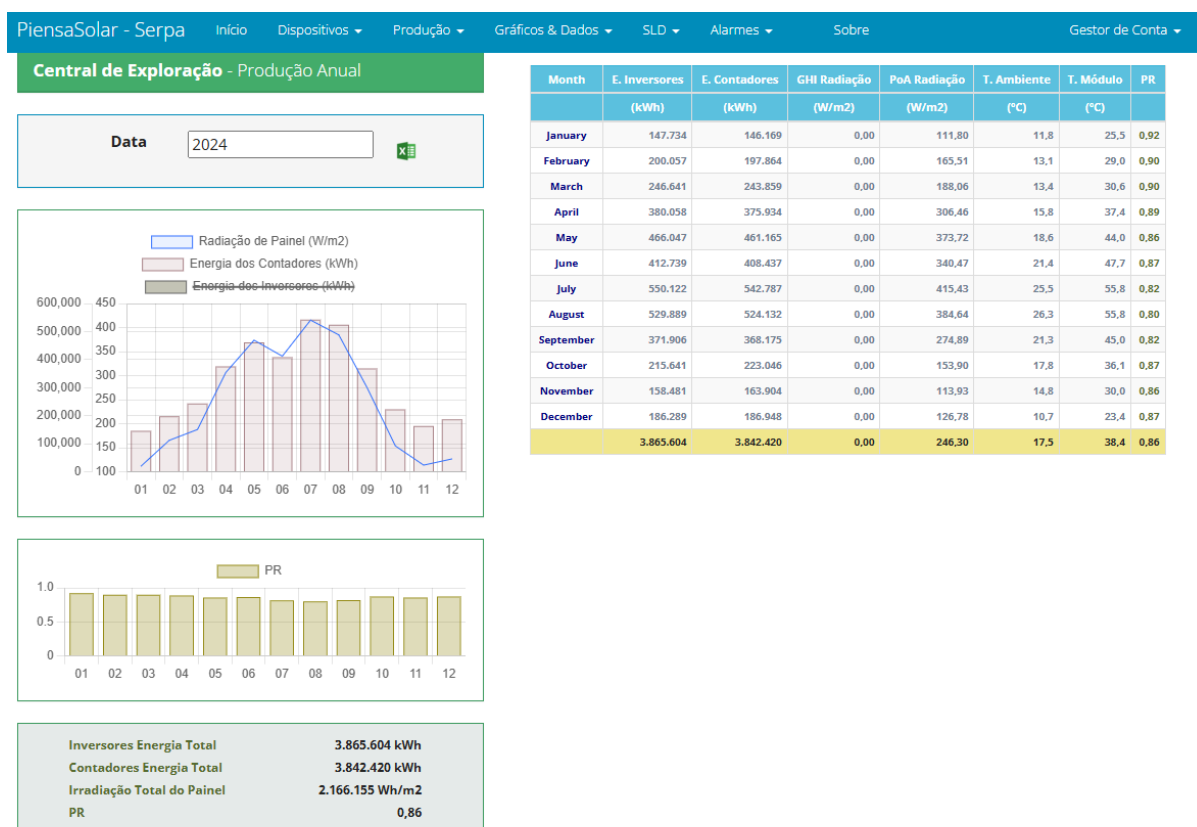


Figura 4.4: Produção no ano de 2024 da central fotovoltaica de Serpa.

Para maior compreensão da eficiência da central fotovoltaica, é essencial uma visualização gráfica das entidades da central com diferentes intervalos de tempo, permitindo obter, de forma especificada, uma noção do estado atual da produção.

Nesta página, é disponibilizada ao operador a possibilidade de gerar gráficos interativos para as componentes monitorizadas pelo SCADA, como os já apresentados na Figura 4.2. Porém, nesta área deverá haver uma expansão dos parâmetros, oferecendo ao utilizador a capacidade de gerar gráficos versáteis, usando métricas ao longo do tempo e métodos comparativos entre diferentes elementos da central.

Posto isto, a Figura 4.5 mostra a página de geração dos gráficos, sendo possível ao operador selecionar o intervalo de tempo do gráfico e, de seguida, diversas componentes individuais e o parâmetro específico para cada componente.

Na Figura 4.6 está apresentado um gráfico gerado no dia 26 de dezembro de 2024, a partir da página representada na Figura 4.5. Este gráfico representa, em intervalos de 35 minutos, a irradiância presente na central fotovoltaica de Tondela, em W/m^2 , e a produção, em kW , de quatro inversores da central.

PiensaSolar - UPP TONDELA Início Dispositivos Produção Gráficos & Dados SLD Alarmes Sobre Gestor de Conta

Graphics & Export Data

From: 30/12/2024 To: 30/12/2024 Aggregation: 5 Minutes Show Results

Contadores

☐ Contador 1.1 ☐ Energia Ativa Exportada (kWh)

☐ Contador 1.2 ☐ Energia Ativa Importada (kWh)

☐ Contador 1.3 ☐ Energia Reativa Exportada (kVarh)

☐ Contador 1.4 ☐ Energia Reativa Importada (kVarh)

Estação Meteorológica

☐ Estação Meteorológica ☐ Irradiancia GHI (W/m2)

☐ Radiação PoA 1 (W/m2)

☐ Albedometro 1 (W/m2)

☐ Albedometro 2 (W/m2)

☐ Radiação PoA 2 (W/m2)

Inversores

☐ Inv. 1.1 ☐ DC Potência (kW)

☐ Inv. 1.2 ☐ AC Potência Activa (kW)

☐ Inv. 1.3 ☐ AC Potência Reactiva (kVar)

☐ Inv. 1.4 ☐ AC Potência Aparente (kVA)

☐ Inv. 2.1 ☐ AC Tensão L12 (V)

PPC

☐ PPC 1.1 ☐ Motivo da Limitação

☐ PPC 1.2 ☐ Setpoint Potência Activa

☐ PPC 1.3 ☐ Setpoint Energia Reativa

☐ PPC 1.4 ☐ Ponto ajuste tg(phi)

☐ V Mode

Relé de proteção

☐ Relé de proteção 1.1 ☐ Potência Activa (kW)

☐ Relé de proteção 1.2 ☐ Potência Reactiva (kVar)

☐ Relé de proteção 1.3 ☐ Potência Aparente (kVA)

☐ Relé de proteção 1.4 ☐ Tensão L12 (V)

☐ Tensão L23 (V)

Sinais Digitais

☐ T.C. 1 Remote Inputs ☐ J1 Seccionador Aberto

☐ T.C. 2 Remote Inputs ☐ J1 Seccionador Fechado

☐ T.C. 3 Remote Inputs ☐ J1 Seccionador Terra Fechado

☐ T.C. 4 Remote Inputs ☐ J1 Seccionador Terra Aberto

☐ J3 Seccionador Fechado

© 2024 - PiensaSolar

Figura 4.5: Página de geração de gráficos da interface SCADA.

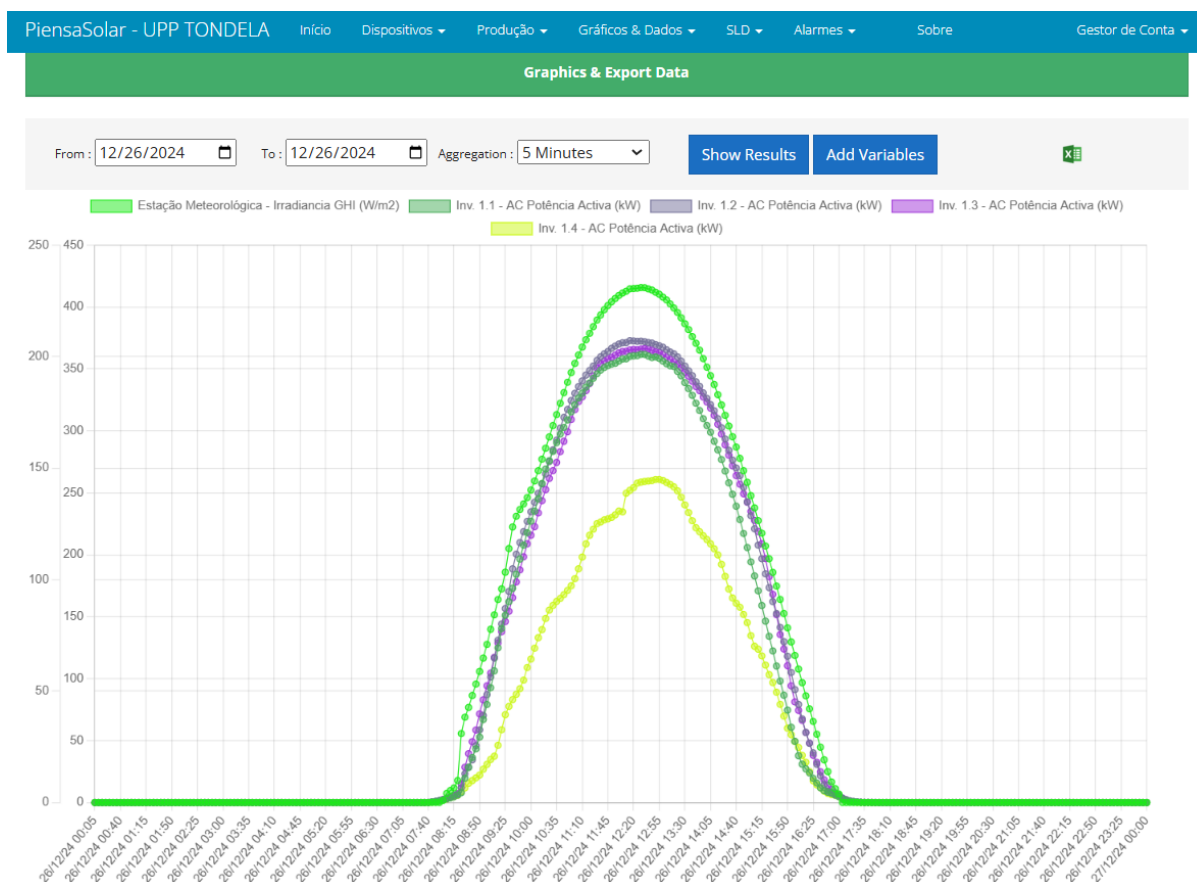


Figura 4.6: Gráfico em tempo real com diversos dados em relação à central fotovoltaica de Tondela.

• Controlo Remoto

O SCADA deve incluir funcionalidades de controlo remoto para ajustar parâmetros de equipamentos da central, interromper a operação, alternar entre diferentes modos de operação e controlar equipamentos críticos, tais como inversores e *trackers*. Estes comandos devem disponibilizar controlos digitais e analógicos, bem como sequências de controlo.

A Figura 4.7 representa o esquema unifilar correspondente a uma das centrais fotovoltaicas sob a responsabilidade da Jayme da Costa, em Fontainhas, sendo possível controlar remotamente a operação, abrindo o disjuntor de linha e interrompendo a produção energética, caso seja necessário.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 apresentam-se os controlos, em tempo real, dos *trackers* correspondentes aos módulos solares, também na central fotovoltaica de Fontainhas, para o dia 30 de dezembro de 2024.

Na parte superior da Figura 4.8, observa-se a possibilidade de forçar o controlo dos *trackers*, com opções para parar, retomar o funcionamento automático, ativar o modo de elevada velocidade do vento ou entrar em modo de segurança. Ainda nesta Figura encontram-se indicadores de estado de cada *tracker*, incluindo os ângulos de inclinação no momento atual e os *setpoints* enviados pelo SCADA, que definem o próximo ângulo de inclinação desejado.

Na Figura 4.9 estão disponíveis comandos de controlo remoto para um *tracker* individual, permitindo a alteração do seu ângulo de inclinação. Além disso, esta Figura apresenta um gráfico da inclinação do *tracker* ao longo do dia corrente.

Por fim, na Figura 4.10 estão representados controlos ao PPC, também para a central de Fontainhas, sendo este uma componente de extrema relevância numa planta solar. Neste contexto, é possível ajustar parâmetros críticos, enviar *setpoints* e limitar a produção de energia. Nesta Figura está presente a página de controlo do PPC, onde se tem acesso aos comandos remotos e ao histórico dos comandos mais recentes.

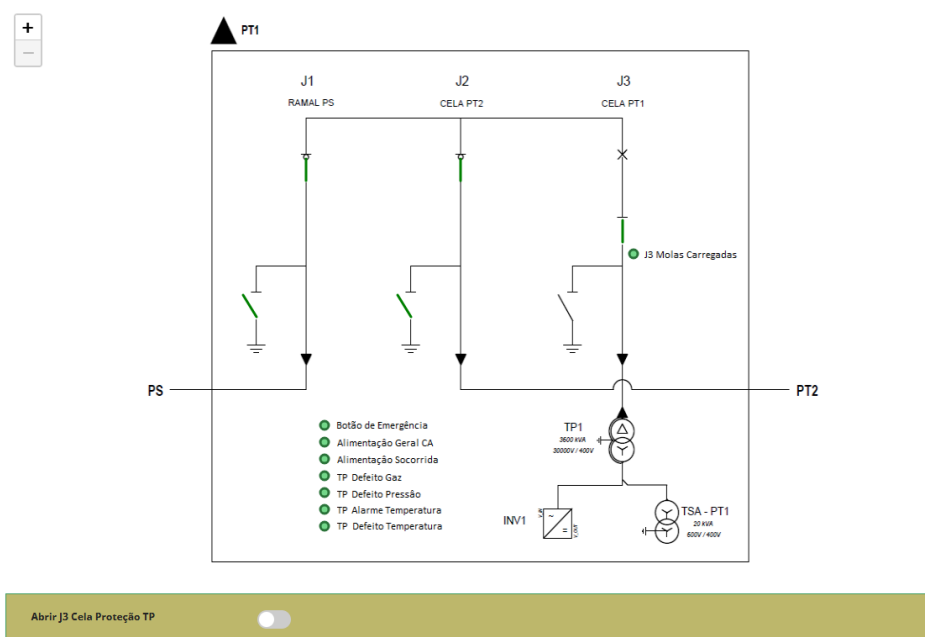


Figura 4.7: Controlo do circuito elétrico em tempo real da central fotovoltaica de Fontainhas.

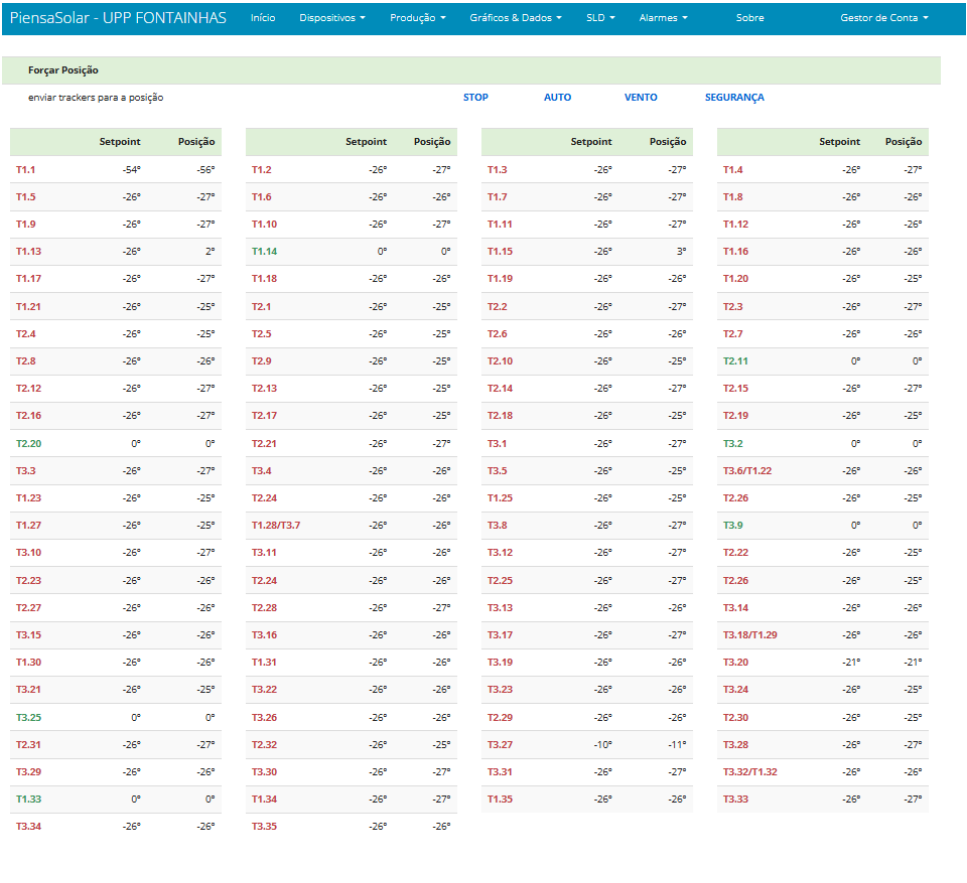


Figura 4.8: Controlo de *trackers* em tempo real da central fotovoltaica de Fontainhas.

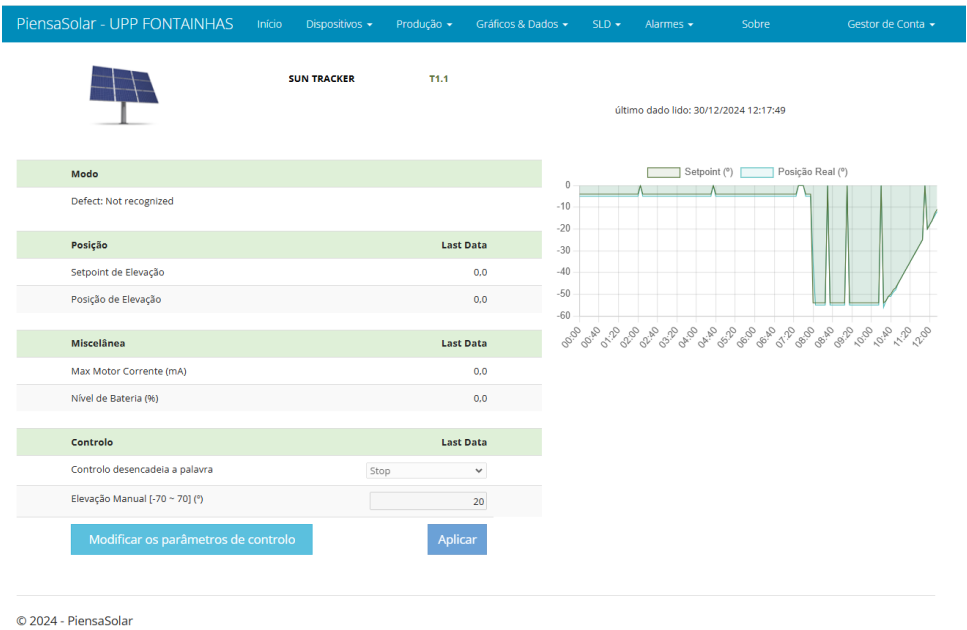
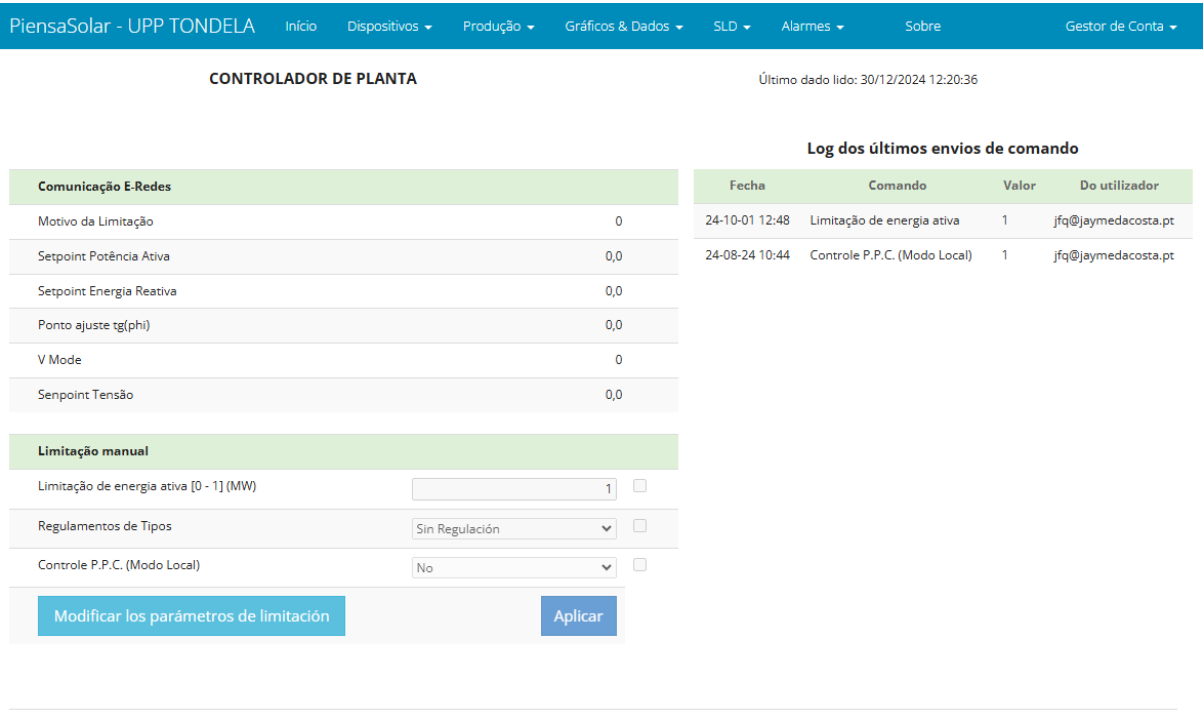


Figura 4.9: Controlo de um *tracker* individual em tempo real da central fotovoltaica de Fontainhas.



© 2024 - PiensaSolar

Figura 4.10: Controlo do PPC em tempo real da central fotovoltaica de Tondela.

• **Gestão de Alarmes e Eventos**

O sistema deve gerar alarmes com base em limites predefinidos ou condições anormais nas componentes da central, notificando a ocorrência de eventos específicos. Os alarmes devem ser priorizados e acompanhados por informações relevantes para a identificação e resolução rápidas. A interface do utilizador deve incluir uma página de visualização de alarmes e eventos, que funcione como ponto de acesso ao sistema de alarmes.

Posto isto, a Figura 4.11 mostra a lista de alarmes e eventos para a central fotovoltaica de Tondela. Nesta Figura, é possível verificar diversos tipos de alarmes e eventos, com uma breve descrição de cada um, podendo ser organizados por tipo de alarme e prioridade.

Ainda nesta Figura, é possível observar a opção de receber o alarme em tempo real via *Telegram*, *e-mail* ou mensagem para o telemóvel do utilizador. O operador pode escolher como receber o alarme, garantindo que a notificação seja efetuada da forma mais eficaz.

A página de gestão de alarmes e eventos da interface SCADA deve incluir uma lista dos alarmes ativos com registo de hora, níveis de gravidade, descrições e funcionalidades para o reconhecimento de cada alarme. Simultaneamente, deverá ser disponibilizado um registo histórico de alarmes e eventos, com opções de filtragem que permitam definir parâmetros como intervalo de datas, gravidade do alarme e equipamentos específicos.

Além disso, cada alarme e evento deverá conter informações detalhadas e, no caso dos alarmes, um conjunto de ações específicas, permitindo ao operador reconhecer o problema e limpar o sistema de alarmes caso este já tenha sido solucionado. Assim, a Figura 4.12 apresenta os alarmes ativos na central fotovoltaica de Tondela, ao dia 15 de janeiro de 2025.

PiensaSolar - UPP TONDELA							
TIPOS DE ALARMES							
Tipo de Elemento		All		Prioridade		All	
Codigo	Tipo de Elemento	Descrição	Prioridade	Temporize (s.)	Enviar a Telegram	Enviar e-mail	Enviar SMS
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Alarme Temperatura	Alarm	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	CBT - QCCP	Alarm	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Controlo Tensão CC	Alarm	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Defeito Gaz	Alarm	5	☒	☒	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Defeito Pressão	Alarm	5	☒	☒	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Defeito Temperatura	Alarm	5	☒	☒	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Disjuntor Desligado	Alarm	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Disjuntor Ligado	Alarm	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Geral 48VCC	Alarm	5	☐	☒	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J1 Seccionador Aberto	Event	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J1 Seccionador Fechado	Event	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J1 Seccionador Terra Aberto	Event	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J1 Seccionador Terra Fechado	Warning	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J3 Seccionador Aberto	Event	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J3 Seccionador Fechado	Event	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J3 Seccionador Terra Aberto	Event	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	J3 Seccionador Terra Fechado	Warning	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Porta MT	Warning	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Porta PT	Warning	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Proteção Alimentação Carregador de Baterias	Alarm	300	☐	☐	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Religação Automática PT	Alarm	5	☒	☒	☐
Editar	Input/Output Remote P.T.1	Watch dog Proteção Interligação	Alarm	5	☒	☒	☐
1000	Input/Output Remote P.T.1	Falha de comunicação	Alarm	300	☒	☒	☐
Editar	Inverter	AC Over Voltage	Alarm	10	☐	☒	☐
Editar	Inverter	AC SPD Fault	Alarm	10	☐	☒	☐

Figura 4.11: Lista de alarmes e eventos da central fotovoltaica de Tondela.

Lista Alarmes

Date

☒Mostrar Alarmes Inacabados

A Partir De :

Até :

☒Mostrar Alarmes

☐Mostrar Warnings

☐Mostrar Eventos

Export

Search:

Início	Elemento	Descrição	Tipo
2025-01-05 12:03:30	T1.1.13	Emergency Stop	Alarm
2025-01-07 15:44:02	T3.1.3	Emergency Stop	Alarm
2025-01-15 09:40:35	T1.1.20	Emergency Stop	Alarm
2025-01-15 11:16:06	T3.1.15	Emergency Stop	Alarm

Showing 1 to 4 of 4 entries

Previous

1

Next

Figura 4.12: Lista de alarmes ativos da central fotovoltaica de Tondela.

- **Relatórios**

O sistema SCADA deverá ser capaz de gerar relatórios personalizáveis que resumam o desempenho da central, a produção de energia e o estado geral do sistema. Estes relatórios devem estar disponíveis em diversos formatos, sendo os mais comuns: PDF, CSV e *Microsoft Excel*, e devem ser acessíveis sob demanda ou em intervalos programados.

A interface do utilizador deve incluir uma Secção dedicada à gestão de relatórios da central, concebida para facilitar a monitorização do desempenho e assegurar um acompanhamento eficaz das exigências do sistema. O SCADA deve oferecer funcionalidades para a exportação de dois tipos principais de relatórios: o sistema de relatórios padrão e os relatórios personalizados.

O sistema de relatórios padrão consiste num conjunto predefinido de relatórios, abrangendo informações diárias, semanais e mensais, com destaque para relatórios de desempenho e resumos de alarmes e eventos. Já os relatórios personalizados permitem ao utilizador definir especificações adaptadas às suas necessidades, possibilitando a seleção de métricas, componentes específicas da central e intervalos de datas alinhados aos seus objetivos.

4.2 Requisitos não Funcionais do Sistema SCADA

Os requisitos não funcionais desempenham um papel essencial no aperfeiçoamento de um sistema SCADA, indo além das funcionalidades básicas para garantir uma operação consistente e confiável.

Estes requisitos, embora não sejam visíveis na utilização comum, são o que confere ao sistema a robustez, a segurança e a adaptabilidade necessárias para atender às exigências do ambiente em que está inserido. Posto isto, nesta Secção serão analisados os principais requisitos não funcionais e a sua relevância para o contexto das centrais fotovoltaicas.

- **Integração**

O SCADA deve integrar-se de forma harmoniosa com o *hardware* e *software* existentes, exigindo uma comunicação coerente e eficiente entre os PLCs, as RTUs, os sensores e quaisquer outras componentes presentes no sistema. Além disso, a capacidade de integração deve permitir a expansão e a atualização do parque, assegurando que o sistema esteja preparado para acomodar inovações tecnológicas.

- **Fiabilidade**

A solução do sistema SCADA deve ser altamente fiável, com tempo de inatividade mínimo e mecanismos robustos de tolerância a falhas, de forma a garantir uma operação contínua durante o tempo de vida previsto para o parque. Isso inclui redundâncias nos sistemas de alimentação, comunicação e armazenamento de dados.

- **Escalabilidade**

O sistema SCADA deve ser escalável de forma a acomodar futuras expansões da central, incluindo painéis e inversores adicionais, assim como a integração de novas tecnologias e soluções como baterias de armazenamento de energia ou a integração de produção eólica (hibridização). A escalabilidade também deve abranger o aumento do número de utilizadores e o crescimento do volume de dados processados.

- **Desempenho**

O sistema deve ser capaz de gerir grandes volumes de dados em tempo real sem comprometer o desempenho. Os tempos de resposta para monitorização, controlo e recuperação de dados devem atender a padrões especificados. Este requisito é crítico para garantir a operação eficiente e a tomada de decisões baseadas em dados atualizados.

- **Manutenibilidade**

O sistema SCADA requer facilidade de manutenção e de atualização, incluindo correções de *software*, atualizações e substituições de *hardware*. Para este efeito, a documentação do sistema deve ser abrangente, fornecendo orientação para a resolução de problemas e administração do SCADA. O suporte técnico eficiente e treinamentos regulares para os operadores também são fundamentais.

- **Conformidade com as Normas e Regulamentos**

O sistema deverá cumprir integralmente os padrões e regulamentos aplicáveis. Em termos de segurança, é imperativo que o sistema esteja em conformidade com as normas relativas à proteção e segurança das redes. No que diz respeito aos regulamentos energéticos, o sistema deverá possibilitar a integração com os sistemas regulamentares locais, garantindo o monitoramento da produção de energia, a elaboração de relatórios e o controlo das emissões de carbono, entre outros requisitos. Nesse contexto, a central deverá respeitar o código da rede e atender prontamente às solicitações do operador de rede, sempre que solicitado.

- **Segurança**

A segurança de um sistema SCADA baseia-se na implementação de medidas que visam proteger o sistema contra acesso não autorizado, violações de dados e ameaças cibernéticas. A proteção do sistema SCADA deve incluir não só a segurança digital, mas também a segurança física das componentes da central fotovoltaica.

Num sistema SCADA, é necessário ter especial cuidado com a forma como ele é protegido, uma vez que a sua vulnerabilidade pode ter consequências graves. Um nível baixo de segurança pode resultar em roubo de informação sensível, manipulação indevida de processos críticos ou furto de elementos físicos. Além disso, ataques cibernéticos ao sistema SCADA podem comprometer não apenas a operação da central fotovoltaica, mas também afetar a estabilidade da rede elétrica e a segurança dos trabalhadores.

Num sistema SCADA em rede, tipologia mais utilizada atualmente, a segurança é implementada através de medidas de proteção em múltiplos níveis. Inicialmente, para garantir a proteção física das componentes e evitar roubos na central, é comum a instalação de sistemas de videovigilância, conhecidos em inglês como *Closed Circuit Television* (CCTV). A videovigilância proporciona a supervisão contínua dos equipamentos da central, permitindo o monitoramento da atividade em tempo real e o registo de todas as ações realizadas no local.

Além disso, é crucial que os equipamentos sejam devidamente cuidados e verificados, de modo a evitar falhas que possam danificá-los. Deve-se também estabelecer protocolos de segurança específicos para as componentes críticas, a fim de proteger a rede elétrica e assegurar a integridade do sistema.

Em relação à segurança cibernética, há diversas soluções aplicáveis a sistemas SCADA e diferentes níveis de segurança, tendo em conta a complexidade da rede em questão. De seguida, estão listadas diversas soluções para a segurança digital da rede.

– Firewall

Uma *firewall* é um sistema de segurança de rede que controla e filtra o acesso aos recursos, baseado em regras predefinidas. A *firewall* atua como uma barreira entre redes internas confiáveis e redes externas não confiáveis, inspecionando e restringindo o tráfego de acordo com as permissões estabelecidas. Uma das suas funções principais é limitar o acesso a determinadas portas e bloquear potenciais ataques, garantindo que apenas tráfego autorizado consiga entrar ou sair da rede [73].

A *firewall* atua como a primeira linha de defesa, filtrando e controlando o tráfego de dados entre a rede da central fotovoltaica e as redes externas, impedindo acessos não autorizados. Configurações robustas de *firewall* garantem que apenas o tráfego legítimo possa atravessar a barreira de segurança, protegendo contra ataques externos.

– Virtual Private Network

Uma *Virtual Private Network* (VPN) assegura que a comunicação entre utilizadores remotos através da interface SCADA e o sistema local ocorra de forma segura e encriptada. Apenas dispositivos ou utilizadores autorizados conseguem aceder à rede, o que reduz, significativamente, o risco de interceptação de dados [15].

As VPNs criam redes privadas dentro de redes públicas, alcançando esse objetivo através da encriptação de dados, codificando as informações trocadas nos canais de comunicação. A simplicidade, o baixo custo e a fiabilidade das VPNs tornam esta solução competitiva no reforço da segurança cibernética, sendo adaptáveis a diversos contextos e requisitos operacionais [74].

Contudo, as VPNs também possuem vulnerabilidades, nomeadamente a suscetibilidade a ataques *Denial of Service* (DoS) e ataques *Distributed Denial of Service* (DDoS), capazes de gerar cargas excessivas em pontos críticos de acesso à rede VPN. Para mitigar este problema, recomenda-se a integração de VPNs com outras medidas de segurança cibernética, como sistemas de prevenção de intrusões e de deteção de intrusões.

Tendo em conta estas duas primeiras componentes de segurança, as Figuras 4.13 e 4.14 [73] apresentam esquemas ilustrativos que representam, de forma comparativa, o funcionamento de uma *firewall* e de redes VPN, de forma a destacar as diferenças nos seus papéis e operações.

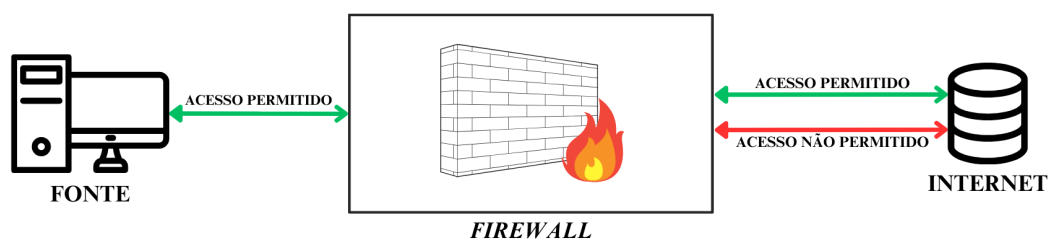


Figura 4.13: Esquema representativo do funcionamento da *firewall*.

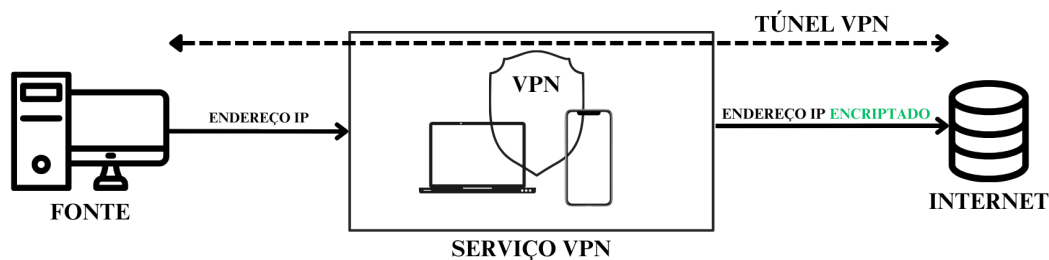


Figura 4.14: Esquema representativo do funcionamento da rede VPN.

Num sistema SCADA mais complexo, estas soluções não são suficientes para mitigar ataques cibernéticos, portanto, existe um nível superior de segurança, englobando sistemas de detecção e de previsão de intrusões, capazes de defender mais eficazmente o sistema SCADA.

– *Intrusion Detection System*

Os sistemas de detecção de intrusão são essenciais na monitorização contínua da rede SCADA. Um *Intrusion Detection System* (IDS) analisa o tráfego da rede, em tempo real, e alerta para comportamentos anormais que possam indicar uma intrusão ou um ataque em curso.

Este tipo de sistemas pode ser associado à rede como um todo, monitorizando a central para identificar padrões suspeitos [75]. Ao mesmo tempo, podem existir sistemas associados a componentes específicas, analisando a sua atividade, protegendo assim os dispositivos contra alterações não autorizadas.

Para além disto, outra forma de categorizar este tipo de sistema é pela sua forma de operação, que pode ser baseada em assinaturas ou em anomalias. A detecção baseada em assinaturas utiliza identificadores únicos para procurar ameaças já reconhecidas como perigosas, tendo como objetivo principal a identificação de ataques realizados por fontes previamente identificadas.

Por outro lado, a detecção baseada em anomalias recorre à criação de um modelo de comportamento normal para a rede ou para o dispositivo em questão. Este modelo serve como referência para monitorizar desvios que possam ocorrer em relação ao padrão predefinido, os quais podem indicar a ocorrência de um ataque cibernético ou de outro incidente de segurança.

– *Intrusion Prevention System*

Um *Intrusion Prevention System* (IPS), assemelha-se aos sistemas IDS no facto de poder ser associado à totalidade da rede ou a um dispositivo específico, e no modo de operação baseado em assinaturas ou em anomalias. Porém, o que distingue estes dois sistemas é que o IPS toma medidas para bloquear ou remediar uma ameaça ou suspeita identificada, enquanto que o IDS apenas alerta o sistema, não agindo perante a detecção [75].

A integração destes sistemas desempenha um papel fundamental na evolução das redes SCADA, permitindo uma resposta ágil a incidentes de segurança, bem como a mitigação de danos potenciais. Nas implementações mais recentes, é possível combinar ambas as soluções, que se complementam mutuamente, fortalecendo de forma significativa a segurança do sistema ao aproveitar as vantagens de cada uma delas.

Para ilustrar de forma mais clara o funcionamento destes sistemas e suas diferenças, as Figuras 4.15 e 4.16 [76] apresentam esquemas representativos da sua operação. Em ambas as Figuras, as setas vermelhas representam o caminho do ataque cibernético, já na Figura 4.15 a seta verde representa o alarme emitido pelo sistema IDS.

Na Secção 5, serão exploradas algumas soluções tendo em conta as redes SCADA mais modernas e as necessidades que o futuro da indústria acarreta no que toca a cibersegurança do ambiente industrial, com foco na proteção de dados, comunicação segura e integração com tecnologias emergentes como a computação em *cloud* associada a dispositivos IoT.

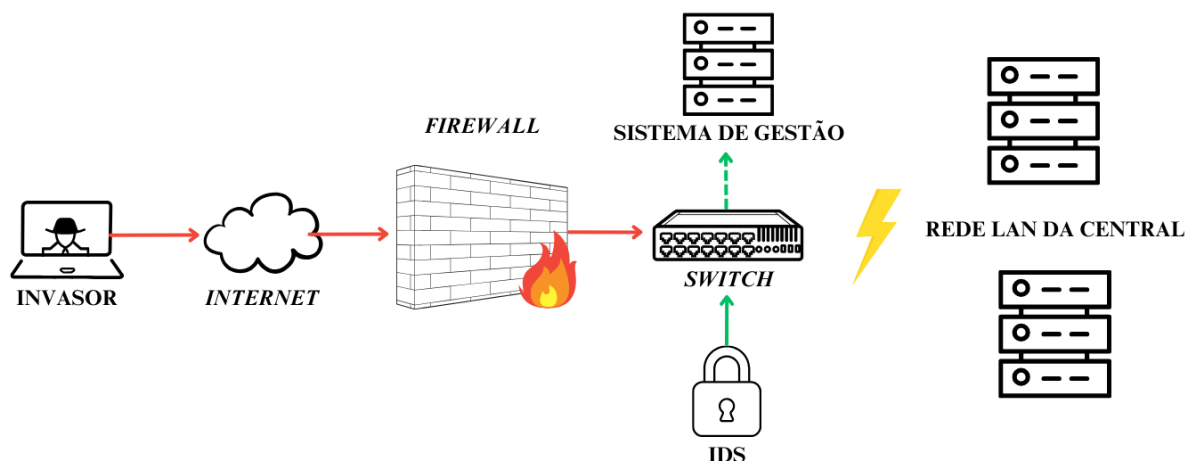


Figura 4.15: Esquema representativo do funcionamento do sistema IDS.

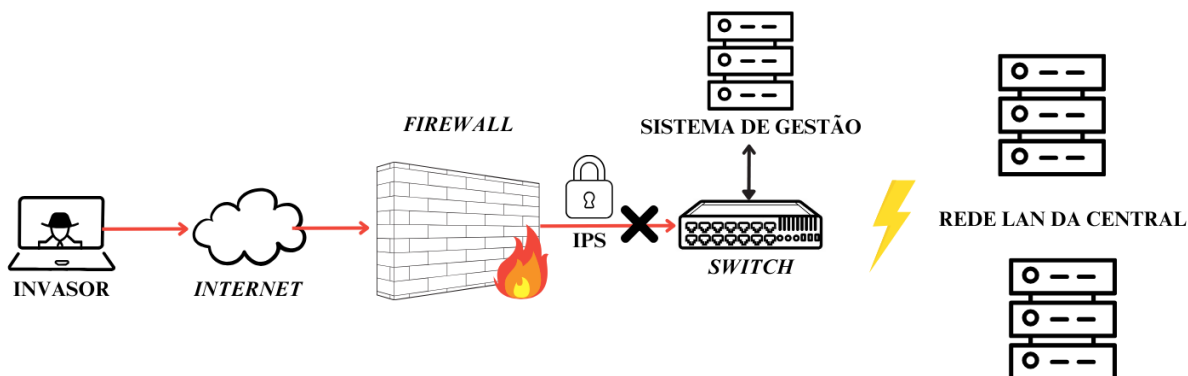


Figura 4.16: Esquema representativo do funcionamento do sistema IPS.

Capítulo 5

Otimizações aplicáveis ao Sistema SCADA

Este Capítulo aborda as melhorias possíveis no sistema SCADA aplicado a centrais fotovoltaicas, destacando o impacto das novas tecnologias emergentes na indústria. O foco recai sobre o aproveitamento de inovações que potenciem a eficiência, a adaptabilidade e a segurança do sistema.

Primeiramente, introduz-se o conceito da Indústria 4.0 e as tecnologias a ela associadas, que desempenham um papel crucial na modernização do sistema SCADA. Em seguida, analisa-se a evolução para uma nova geração de sistemas SCADA, onde essas tecnologias são aplicadas de forma prática. Por fim, são examinadas soluções avançadas de segurança e melhorias nos protocolos de comunicação, de modo a responder às novas exigências operacionais.

5.1 Avanços Tecnológicos aplicados ao Sistema SCADA

A indústria está em constante evolução, tornando-se cada vez mais apta a enfrentar novos desafios e a melhorar a sua eficiência, sustentabilidade e flexibilidade, respondendo de forma mais rápida às exigências do mercado e às mudanças nos processos de produção. O conceito de Indústria 4.0 refere-se a uma nova fase da revolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias digitais em toda a cadeia de produção. Este conceito visa aumentar a capacidade de monitorização e controlo em tempo real, incorporando tecnologias inteligentes e inovadoras.

Os avanços tecnológicos associados à Indústria 4.0 criam, portanto, um ambiente onde sistemas SCADA podem evoluir para plataformas mais conectadas, preditivas e resilientes, melhorando significativamente a gestão e o controlo de processos industriais.

Entre as inovações mais relevantes estão a integração de dispositivos IoT e o uso de soluções em *cloud*, que permitem não só uma maior interconexão entre dispositivos, mas também uma capacidade superior de processamento e análise de dados. Contudo, esta transformação tecnológica traz consigo novos desafios, especialmente no que diz respeito à segurança e confiabilidade das operações.

A Indústria 4.0 abrange uma ampla gama de tecnologias inovadoras que têm impulsionado a automação e a conectividade nos processos industriais. Para acompanhar esta transformação, os sistemas SCADA estão a evoluir para uma quarta geração, denominada IoT SCADA, que reflete a modernização necessária para atender às exigências crescentes de eficiência, flexibilidade e integração.

Esta nova geração é caracterizada pela adoção de soluções tecnológicas avançadas que permitem uma maior interligação e monitorização das operações, proporcionando novas capacidades aos sistemas industriais. Posto isto, algumas destas tecnologias estão descritas de seguida.

- **Internet of Things**

A *Internet of Things* é uma infraestrutura global que conecta dispositivos físicos e virtuais a partir da *Internet*, viabilizando a troca de informações em tempo real, promovendo uma integração mais fluida e abrangente entre os diferentes elementos do sistema [77]. Estes sistemas são constituídos por dispositivos inteligentes, em inglês *smart devices*, que funcionam com base em protocolos específicos, possibilitando assim a comunicação entre eles. Estes dispositivos incluem uma variedade de elementos, como veículos, edifícios e outros equipamentos de eletrônica, como *softwares*, controladores e sensores [78]. Perante a diversidade de utilizações, os conceitos de IoT são aplicáveis a grande parte das indústrias e serviços.

A *Industrial Internet of Things* (IIoT) aplica os conceitos do IoT à indústria, promovendo a interconexão de dispositivos inteligentes, como sensores e atuadores, controladores e sistemas SCADA. Esta integração permite uma supervisão e controlo mais eficaz, dado que os sistemas SCADA podem recolher, processar e analisar grandes volumes de dados em tempo real, provenientes de diferentes fontes na instalação industrial.

Além disso, a conectividade à *Internet* através dos dispositivos IoT facilita o acesso remoto e a centralização de operações. Ao mesmo tempo, esta implementação viabiliza a monitorização preditiva e a implementação de automatismos mais avançados, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência geral.

- **Computação em Cloud**

Dentro destas tecnologias modernas, uma das mais relevantes e transversais é a *cloud*, que se consolidou como uma solução eficaz para diversas problemáticas contemporâneas. A *cloud* permite a gestão, o armazenamento e o processamento de dados e serviços computacionais através da *Internet*, eliminando a necessidade de manter estes recursos em dispositivos físicos individuais e possibilitando o acesso direto por dispositivos IoT [77]. Na Figura 5.1, está representado o conceito de rede *cloud* aliada às tecnologias IoT, onde diversos ramos de atividade estão interligados à *cloud* através da *Internet*.



Figura 5.1: Representação gráfica da interligação entre IoT e a rede *cloud*.

Estas características tornam o uso da *cloud* uma forma eficiente de reduzir tanto o espaço ocupado como os custos, já que elimina a necessidade de servidores próprios para armazenar a informação, assim como os encargos associados à sua manutenção, frequentemente dispendiosa.

A *cloud* permite a interconexão de componentes de forma totalmente digital, promovendo a evolução da indústria para sistemas mais avançados e satisfazendo as exigências da sociedade moderna. Nos últimos anos, a computação em *cloud* tem sido amplamente explorada para a manipulação e processamento de dados, execução de algoritmos e realização de cálculos complexos [79].

O conceito de *cloud* divide-se em duas categorias essenciais para a escolha da configuração a utilizar: os modelos de implementação e os modelos de serviço. Os modelos de implementação incluem redes públicas, redes privadas e redes híbridas, três configurações distintas que variam consoante o nível de privacidade da rede *cloud*. Na Tabela 5.1, apresentam-se os diferentes tipos de rede *cloud* e as suas principais características.

Relativamente aos modelos de serviço, existem três opções principais: *Software as a Service* (SaaS), *Platform as a Service* (PaaS) e *Infrastructure as a Service* (IaaS) [80]. Na Tabela 5.2, apresentam-se os modelos de serviço e as suas características.

Assim, dependendo do contexto, será necessário equilibrar o tipo de rede e o modelo de serviço *cloud* mais adequado à situação em questão. A *cloud* é um elemento crucial para a nova revolução industrial, com uma aplicação direta nos sistemas SCADA, estando no centro da próxima geração destes sistemas.

Tabela 5.1: Resumo das características dos tipos de redes *cloud*.

Tipo de Rede	Características
Rede Privada	Exclusiva de uma única organização. Pode estar localizada internamente ou ser gerida por um fornecedor, mas a infraestrutura é sempre dedicada à organização. Oferece maior controlo e segurança, adequada para privacidade e personalização.
Rede Pública	Destaca-se a sua elevada escalabilidade, uma vez que o serviço é disponibilizado por um fornecedor, ou <i>provider</i> , sendo o utilizador cobrado apenas pelos recursos efetivamente consumidos, ficando o fornecedor responsável pela manutenção do sistema. Exemplos de <i>providers</i> amplamente utilizados incluem a <i>Amazon Web Services</i> , a <i>Microsoft Azure</i> e a <i>Google Cloud Platform</i> . Esta rede pública é partilhada por diversas organizações e permite acesso via <i>Internet</i> , com <i>hardware</i> e <i>software</i> sob responsabilidade do fornecedor.
Rede Híbrida	Combina infraestruturas locais ou privadas com a <i>cloud</i> pública. Permite migração de dados entre ambientes, oferecendo controlo para ativos sensíveis, flexibilidade para recursos adicionais e controlo de custos ao pagar apenas por poder de computação extra quando necessário. Facilita uma transição gradual para a <i>cloud</i> .

Tabela 5.2: Resumo dos modelos de serviço em *cloud computing*.

Modelo de Serviço	Características
Software as a Service	Aplicações fornecidas diretamente aos utilizadores finais via <i>Internet</i> , sem necessidade de instalação local. O <i>provider</i> gere toda a infraestrutura, segurança e manutenção.
Platform as a Service	Plataforma para desenvolvedores criarem, testarem e implementarem aplicações. Inclui ferramentas como interfaces de programação, bancos de dados e serviços de armazenamento. O foco é simplificar o desenvolvimento de <i>software</i> .
Infrastructure as a Service	Recursos virtualizados, como servidores e redes. Permite às organizações ajustar os recursos conforme necessário, sem investimento em <i>hardware</i> físico.

• Artificial Intelligence / Machine Learning

A *artificial intelligence* (AI) define a capacidade de máquinas ou sistemas serem equipados com algoritmos capazes de raciocinar e executar funções autonomamente, como: resolução de problemas, análise preditiva, reconhecimento de objetos e palavras, ou tomada de decisões [81].

Mais concretamente, a AI representa uma panóplia de conceitos computacionais que conseguem reconhecer padrões e identificar questões não lineares a partir dos dados recebidos. Estas técnicas têm como objetivo imitar o comportamento humano, permitindo que as máquinas automatizem decisões racionais que, tradicionalmente, seriam realizadas por pessoas.

Além disso, as abordagens de AI são projetadas para lidar com dados ausentes, adaptando-se a situações em evolução e melhorando, progressivamente, o seu desempenho com base na experiência acumulada. Essa capacidade de aprendizagem e adaptação é uma das características fundamentais da inteligência artificial, permitindo que sistemas inteligentes se tornem mais eficientes e eficazes ao longo do tempo [82].

O *machine learning* (ML) insere-se no conceito de inteligência artificial, utilizando algoritmos de forma a ensinar computadores a realizar tarefas específicas com base em dados prévios. Em vez de programar manualmente cada passo, estes algoritmos aprendem a identificar padrões nos dados e a fazer previsões para novas situações [83]. Na Tabela 5.3 destacam-se os três tipos principais de aprendizagem automática, ou *machine learning* [84].

No que diz respeito ao AI, mais concretamente ao *machine learning*, aplicado a sistemas SCADA, as aplicações são inúmeras, uma vez que a partir da previsão e da aprendizagem automatizada é possível otimizar a operação e a manutenção dos sistemas. Entre as aplicações mais comuns, destacam-se a deteção de anomalias, a previsão de falhas, a análise de desempenho e a gestão preditiva de recursos.

Através da análise de dados históricos, algoritmos de aprendizagem supervisionada podem identificar padrões que antecipam falhas em equipamentos, permitindo uma manutenção proativa, reduzindo custos e tempos de inatividade. Além disso, técnicas de aprendizagem não supervisionada podem ser utilizadas para identificar comportamentos anómalos nas redes de comunicação, contribuindo para a melhoria da segurança cibernética. A utilização de *machine learning* em sistemas SCADA oferece, assim, não só maior eficiência operacional, mas também maior resiliência contra ataques externos e falhas imprevistas.

Tabela 5.3: Resumo dos tipos de aprendizagem em *machine learning*.

Tipo de Aprendizagem	Descrição
Aprendizagem Supervisionada	A aprendizagem supervisionada é treinada com dados que já têm respostas conhecidas, permitindo que o algoritmo aprenda a fazer previsões ou classificações. O objetivo é que o modelo aprenda a mapear as entradas para as saídas corretas, de forma a poder fazer previsões em novos dados que não foram vistos anteriormente.
Aprendizagem Não Supervisionada	A aprendizagem não supervisionada analisa dados sem rótulos, tentando encontrar padrões ou conexões por conta própria. O objetivo deste tipo de <i>machine learning</i> é encontrar padrões, estruturas ou agrupamentos nos dados, sendo que este modelo tenta organizar os dados de maneira que as entradas semelhantes fiquem agrupadas.
Aprendizagem por Reforço	Na aprendizagem por reforço, um sistema virtual aprende a tomar decisões por meio de tentativas e erros, recebendo recompensas ou penalizações. O objetivo é maximizar a recompensa total ao longo do tempo, aprendendo quais ações levarão aos melhores resultados.

Neste contexto, é também importante compreender que não existe um algoritmo que funcione perfeitamente para todas as situações. Muitas vezes, é preciso testar vários tipos de aprendizagem e de algoritmos de forma a escolher o que oferece o melhor desempenho para o problema em questão.

- **Big Data**

O conceito de *big data* engloba a análise e gestão de conjuntos de dados extremamente vastos e complexos, provenientes de diferentes fontes, tais como sensores industriais, sistemas SCADA, redes sociais, dispositivos IoT e transações comerciais. Estes dados não podem ser processados de forma eficiente por métodos tradicionais de gestão e análise de dados e são gerados a uma velocidade crescente [85].

O conceito de *big data* é frequentemente caracterizado por um conjunto de atributos fundamentais conhecidos como os "Cinco Vs". Estes elementos ajudam a descrever os desafios e as oportunidades associados à gestão e análise de grandes volumes de dados. Cada um dos "Vs" representa uma dimensão específica que influencia a forma como os dados são recolhidos, armazenados, processados e transformados em conhecimento útil [86]. Posto isto, na Tabela 5.4 é possível observar cada uma das cinco dimensões e a sua descrição, de forma a compreender melhor este conceito.

Tabela 5.4: Resumo das dimensões do *big data*.

Dimensão	Descrição
Volume	Refere-se à enorme quantidade de dados gerados continuamente, provenientes de diversas fontes, como dispositivos IoT, redes sociais, transações comerciais e sistemas SCADA.
Velocidade	Representa a rapidez com que os dados são gerados, transmitidos e processados. A capacidade de analisar dados em tempo real é crucial para decisões rápidas e eficazes.
Variedade	Engloba os diferentes tipos de dados, incluindo dados estruturados (bases de dados), não estruturados (textos, imagens) e semiestruturados (históricos de sensores).
Veracidade	Relaciona-se com a qualidade e a fiabilidade dos dados. Garantir a precisão das informações é fundamental para evitar decisões baseadas em dados incorretos.
Valor	Refere-se à capacidade de extrair conhecimento útil dos dados. O verdadeiro potencial do <i>big data</i> está na transformação de dados brutos em apontamentos relevantes, agregando valor às operações.

5.2 Quarta Geração do Sistema SCADA

No Capítulo 2, foram apresentadas as primeiras três gerações do sistema SCADA, sendo a terceira geração, o SCADA em rede, a configuração mais comum devido à sua eficiência, facilidade de implementação e ampla adoção por parte da engenharia.

Contudo, com os avanços tecnológicos, começa a emergir uma quarta geração de SCADA, caracterizada pela integração de *software* mais avançado, microprocessadores de alto desempenho e tecnologias sem fios de última geração. Este progresso incorpora o uso da computação em *cloud* e conceitos da IoT, resultando numa versão mais robusta e eficiente, designada IoT SCADA. Esta nova geração representa um salto significativo, permitindo sistemas mais robustos e eficientes, com benefícios consideráveis para a produção energética.

5.2.1 Arquitetura da Quarta Geração do Sistema SCADA

Na Figura 5.2, é representada de forma simplificada a arquitetura desta geração, onde o sistema SCADA das estações locais de geração energética é acessível a partir da *cloud*, que gerencia toda a informação [24]. O conceito de IoT SCADA difere das gerações anteriores por integrar conectividade IP diretamente nos dispositivos, permitindo que sensores, atuadores e controladores comuniquem, em tempo real, através da *Internet*. Esta integração direta com a *Internet* não só proporciona um controlo remoto mais detalhado, mas também viabiliza um novo nível de monitorização, acessível de praticamente qualquer lugar, a qualquer momento. No entanto, é necessário que o sistema SCADA da rede LAN continue operacional localmente caso a *Internet* falhe, sendo fundamental garantir essa continuidade para evitar dependência total da conectividade online.

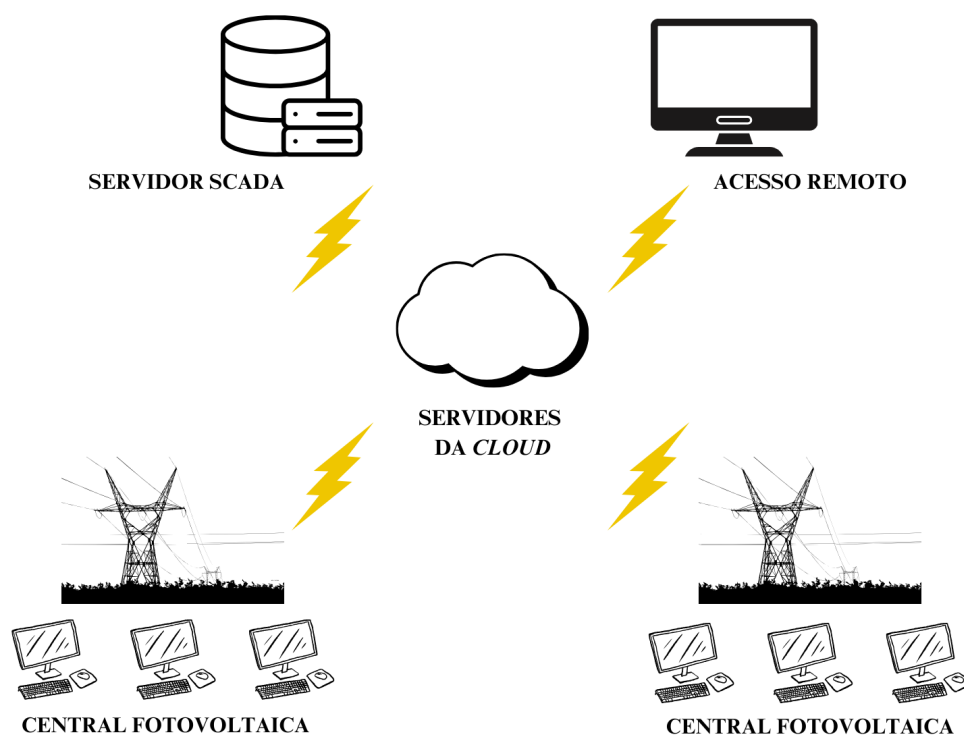


Figura 5.2: Arquitetura do sistema IoT SCADA.

Esta geração de SCADA capacita o sistema a processar dados em tempo real e, simultaneamente, permite-lhe realizar análises preditivas através de algoritmos de *machine learning* e da análise de *big data*. Estas capacidades não só otimizam a resposta aos dados recolhidos, como também habilitam o sistema a executar diagnósticos baseados nas previsões geradas.

Com estas características, os operadores tornam-se capazes de identificar falhas muito rapidamente, prever problemas e realizar ajustes preventivos nos sistemas [77]. Ao mesmo tempo, estes algoritmos permitem também que medidas de segurança, através de controlos remotos, sejam executadas de forma automática com base nas previsões realizadas pelos algoritmos.

Assim, o IoT SCADA promove uma gestão mais eficiente e adaptativa dos processos, reduzindo o tempo de inatividade dos sistemas e melhorando a qualidade das operações de supervisão. Esta geração mais recente contribui diretamente para a geração de energia, proporcionando uma maior flexibilidade e posicionando-se como uma ferramenta essencial na evolução da indústria moderna.

Em situações de transição tecnológica como esta, é comum que alguns sistemas SCADA em rede estejam a migrar para a nova geração, implementando medidas para tal, mas ainda operando de forma híbrida, utilizando técnicas de ambas as gerações.

5.2.2 Segurança Avançada aplicada ao Sistema SCADA

A introdução de conceitos associados à IoT e à integração de redes em *cloud* trouxe novos desafios para a segurança dos processos industriais e, consequentemente, para os sistemas SCADA. Esta evolução tecnológica requer a implementação de estratégias de proteção inovadoras e adequadas às características específicas desta nova arquitetura. Abaixo, apresentam-se algumas das principais práticas recomendadas para reforçar a segurança destes sistemas.

- **Encriptação de Dados**

Com a transição para servidores na *cloud*, a encriptação de dados torna-se essencial. Tanto os dados armazenados quanto os dados em movimento devem ser encriptados, assegurando que, caso a comunicação seja interceptada, a informação permaneça ilegível para qualquer atacante. A encriptação protege os dados contra acessos não autorizados e garante a confidencialidade da informação.

- **Autenticação e Controlo**

A autenticação é o processo de verificar a autenticidade de um usuário ou dispositivo e pode ser realizada por meio de credenciais ou fatores, como nome de utilizador e senha, reconhecimento facial ou impressão digital. O uso do controlo de acesso biométrico, ou via credencial, impede que pessoal não autorizado acesse servidores ou outros dispositivos críticos do sistema SCADA. Ao aumentar o nível de segurança com a autenticação multifator, reduz-se o risco de acesso não autorizado, mesmo no caso de comprometimento de uma credencial. A constante monitorização, especialmente dos dispositivos IoT, é crucial.

- **Análise de Riscos e Testes de Penetração**

Realizar avaliações regulares de risco e testes de penetração na rede é indispensável para proteger o sistema SCADA. Estes processos ajudam a detetar fragilidades ou vulnerabilidades que possam ser exploradas, permitindo atuar preventivamente para evitar que se transformem em problemas concretos. Trata-se de uma abordagem preventiva que fortalece a segurança do sistema e o torna menos suscetível a ataques externos.

- **Segmentação de Rede**

Separar a rede SCADA em segmentos distintos, seja de forma física ou lógica, é uma medida eficaz para aumentar a segurança. Ao manter o sistema de supervisão e controlo isolado da rede *cloud*, reduz-se a exposição do sistema a potenciais ameaças. Além disso, essa separação limita o acesso a dados sensíveis e dificulta a propagação de ataques, caso ocorram. Essa organização torna o sistema mais seguro e resiliente.

- **Gestão de Atualizações**

Manter os equipamentos do sistema SCADA atualizados é essencial para garantir o bom funcionamento e a segurança do sistema. Atualizações regulares do *firmware* ajudam a resolver falhas, introduzem melhorias e asseguram que os dispositivos estão preparados para enfrentar novas exigências. Além disso, aplicar os *patches* de segurança mais recentes permite corrigir vulnerabilidades conhecidas, protegendo o sistema contra potenciais ameaças. Também é importante ter antivírus instalados nas componentes críticas, uma vez que ajudam a identificar e bloquear possíveis ataques, adicionando uma camada extra de proteção. Assim, a combinação destas medidas garante que o sistema SCADA mantém a sua integridade e permanece protegido contra riscos.

- **Política de Backup e Recuperação**

Ter uma política de *backup* robusta é fundamental para assegurar a continuidade do sistema, mesmo perante falhas ou incidentes. As cópias de segurança, quando bem planeadas, permitem recuperar rapidamente os dados e minimizar impactos.

Utilizar soluções em *cloud* é uma abordagem vantajosa, especialmente se combinada com criptografia e armazenamento em diferentes localizações, para assegurar maior fiabilidade. Desta forma, o sistema está preparado para lidar com imprevistos, mantendo a continuidade operacional e protegendo a integridade dos dados.

A implementação destas camadas de segurança oferece uma abordagem robusta, garantindo que os sistemas SCADA estejam protegidos enquanto se adaptam aos novos desafios tecnológicos.

5.2.3 Comunicação Avançada aplicada ao Sistema SCADA

Com a evolução da indústria, diversas soluções foram exploradas para estabelecer uma interligação eficaz entre as componentes dos processos industriais. Num determinado momento, empresas de maior dimensão começaram a desenvolver os seus próprios protocolos, com o objetivo de tornar os seus serviços exclusivos, criando uma necessidade de manutenção contínua, especializada e específica realizada pelas empresas em questão. Neste contexto, o IEC criou normas e protocolos universais, como o IEC 104 e o IEC 61850, para mitigar essa exclusividade e promover uma comunicação mais abrangente.

Atualmente, os protocolos mais utilizados na indústria para sistemas SCADA e, especificamente, no contexto da supervisão de centrais fotovoltaicas, são o *Modbus* TCP/IP e o *Modbus* RTU, devido à sua ampla disseminação e facilidade de implementação. No entanto, estes protocolos apresentam limitações significativas, especialmente em sistemas SCADA de quarta geração, não se destacando pela segurança nem pela flexibilidade, e enfrentam ainda desafios na integração com novas tecnologias.

Perante estas limitações, surgiu o interesse em desenvolver soluções mais robustas, entre as quais o protocolo de comunicação *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA), mencionado na Secção 3 como sendo um protocolo associado a tecnologias mais recentes. Este protocolo é uma evolução do *Open Platform Communications (OPC) Original*, cujo objetivo era competir com protocolos de comunicação específicos dos controladores, criando um sistema capaz de estabelecer comunicação entre dispositivos de diferentes fabricantes, padronizando-a. Este protocolo propõe a troca segura e confiável de dados na automação industrial e em outros setores [87].

Com o tempo, as especificações do OPC foram expandidas para incluir a versão OPC UA, que oferece uma plataforma aberta, escalável e extensível. Tal como o OPC original, este protocolo foi concebido para promover a interoperabilidade entre dispositivos e sistemas em ambientes industriais. A arquitetura flexível, baseada em serviços, permite a troca eficiente de dados e a integração segura de tecnologias recentes, como IoT, inteligência artificial e *big data*. Destaca-se pelo seu modelo de dados abrangente, suportando comunicação bidirecional e possibilitando a interação com diferentes tipos de dados e objetos.

O OPC UA surgiu da necessidade de superar as limitações de protocolos anteriores, como o *Modbus* e o *Profibus*, que não são suficientemente escaláveis nem seguros para as exigências atuais da indústria. Sendo este protocolo baseado em redes TCP/IP, adapta-se facilmente aos protocolos *Ethernet*, permitindo a sua implementação em redes deste tipo. Isto significa que qualquer sistema que utilize *Ethernet* pode, potencialmente, ser integrado com o OPC UA, facilitando a modernização das infraestruturas [88].

Uma das características mais avançadas do OPC UA é suportar o padrão de comunicação *Publish-Subscribe*, através do modelo hierárquico *Client-Server*, permitindo uma comunicação mais eficiente, especialmente em sistemas distribuídos.

Esta abordagem facilita a transmissão de dados em tempo real entre diversos dispositivos e aplicações e possibilita a partilha de dados históricos, alarmes e eventos. Além disto, facilita o processamento de informações, conforme exigido pela evolução das necessidades industriais [89].

De forma a utilizar o protocolo OPC UA num sistema SCADA, é necessário instalar o *software* OPC UA *Server*, que conecta os dispositivos de recolha de dados, os controladores, os servidores e as interfaces HMI. Neste sentido, é também imprescindível o *software* OPC UA *Client*, para interagir com o servidor OPC UA e configurar as subscrições relativas aos clientes.

O *software* de cliente OPC UA pode ser instalado no mesmo computador que o servidor OPC UA, numa máquina diferente na mesma rede, ou em qualquer computador ligado à *Internet* ou à *cloud*. Como o cliente OPC UA utiliza protocolos TCP/IP para se conectar ao servidor, pode estar localizado em qualquer lugar, tornando este protocolo extremamente relevante [88].

Na Figura 5.3 está representado o sistema OPC UA, onde os controladores e coletores de dados estão conectados ao servidor OPC UA, que, por sua vez, está ligado a clientes, desde servidores SCADA e da *cloud*, a dispositivos HMI. Na Figura, observa-se a situação previamente referida, em que um cliente OPC UA pode estar localizado fisicamente no mesmo computador que o servidor.

Além disso, o OPC UA integra robustos mecanismos de segurança e é independente da plataforma, podendo ser implementado em diversos sistemas operativos, como *Microsoft Windows*, *Android*, *macOS* e *Linux* [88]. A escalabilidade do protocolo permite a integração de dispositivos e sistemas de diferentes fabricantes, o que é especialmente benéfico em ambientes industriais caracterizados pela diversidade de equipamentos.

No entanto, apesar das suas inúmeras vantagens, a implementação do OPC UA num sistema SCADA pode exigir um maior esforço em termos de configuração e manutenção, especialmente em sistemas antigos que utilizem outros protocolos menos recentes. A sua maior complexidade pode também implicar custos adicionais de implementação e adaptação, os quais devem ser ponderados no planeamento da integração de novos sistemas.

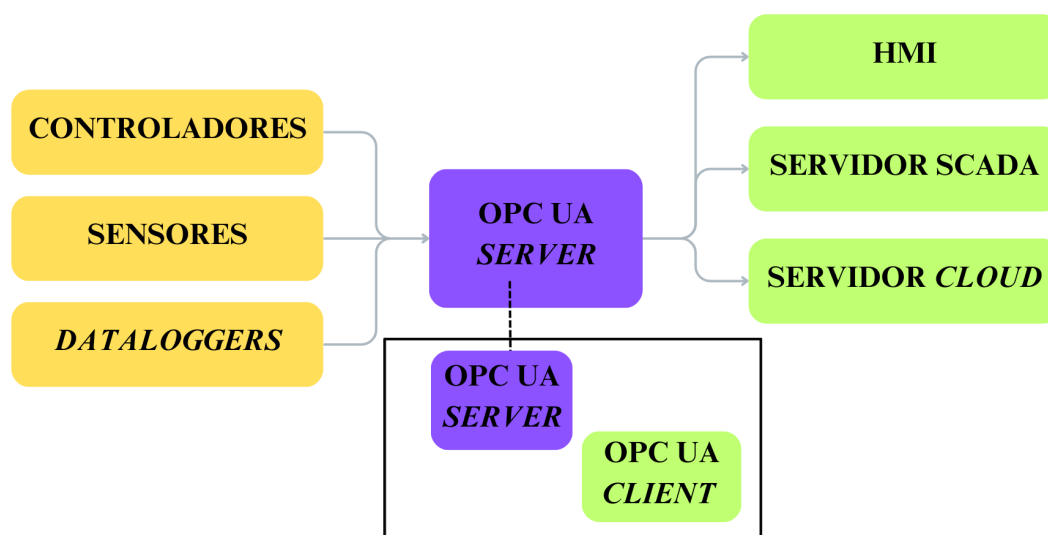


Figura 5.3: Esquema representativo do protocolo de comunicação OPC UA.

Capítulo 6

Conclusões e Perspetivas Futuras

A realização deste trabalho proporcionou um entendimento aprofundado sobre os sistemas SCADA e o funcionamento das centrais fotovoltaicas. A dissertação cumpriu os objetivos propostos, detalhando as componentes e as interligações de um sistema SCADA aplicado à produção solar, bem como descrevendo as exigências e as funcionalidades do sistema de supervisão e controlo.

Este documento oferece à Jayme da Costa informações de elevada relevância, organizadas de forma criteriosa, no contexto da aplicação atual dos sistemas SCADA em centrais fotovoltaicas. Adicionalmente, a documentação técnica constitui uma ferramenta essencial para a formação interna, capacitando os colaboradores da JdC com um conhecimento abrangente sobre os sistemas SCADA, a sua interação com as centrais fotovoltaicas e as respetivas componentes.

No que respeita à resiliência e eficiência dos processos, a especificação detalhada do sistema SCADA representa uma contribuição significativa para aumentar a adaptabilidade da empresa às exigências do mercado. A implementação de um sistema de supervisão e controlo devidamente estruturado promove a agilização de processos e a melhoria na tomada de decisões. Estas melhorias traduzem-se em benefícios tangíveis para a empresa, como a redução de perdas operacionais e o aproveitamento mais eficaz dos recursos disponíveis.

Os Capítulos 3 e 4 abordam a padronização dos sistemas SCADA aplicados a centrais fotovoltaicas, detalhando as componentes necessárias e a sua integração no sistema. Adicionalmente, são apresentados os requisitos funcionais e não funcionais de um sistema SCADA neste contexto, consolidando toda a informação pertinente para este estudo.

O presente trabalho também explorou possíveis melhorias para a empresa, destacando as vantagens da integração de tecnologias emergentes, como a *cloud* e o IoT, na nova geração de sistemas SCADA. Estas tecnologias não só aumentam a flexibilidade e escalabilidade do sistema, mas também permitem uma gestão mais eficiente e ágil das operações, resultando numa redução de custos e numa melhoria da performance global. O Capítulo 5 apresenta recomendações para estas melhorias, que poderão ser aprofundadas, testadas e implementadas nas centrais da empresa. Estas inovações poderão, futuramente, ser incorporadas no processo padrão de implementação de sistemas de supervisão, controlo e aquisição de dados, contribuindo para a evolução contínua da organização.

Em síntese, este trabalho permitiu à Jayme da Costa consolidar o seu conhecimento sobre sistemas SCADA aplicados a centrais fotovoltaicas, materializado numa documentação técnica única que a capacita para implementar soluções mais eficientes e resilientes.

Adicionalmente, este documento introduz propostas de modernização, integrando tecnologias emergentes e adaptando os sistemas SCADA existentes, melhorando os processos e a performance global do sistema.

Por fim, este trabalho reforça a importância de investir na modernização e padronização de processos industriais críticos, particularmente num setor em constante evolução como o das energias renováveis. A documentação desenvolvida não só serve como uma base técnica robusta para futuras implementações, mas também como ponto de partida para novos projetos e inovações, contribuindo para o avanço das centrais fotovoltaicas.

Referências

- [1] Yashwant Sawle e M. Thirunavukkarasu. Techno-economic comparative assessment of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification of remote area. *Design, Analysis and Applications of Renewable Energy Systems*, páginas 199–247, 1 2021. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [2] Arechkik Ameer, Asmae Berrada, Khalid Loudiyi, e Raymond Adomatis. Performance and energetic modeling of hybrid pv systems coupled with battery energy storage. *Hybrid Energy System Models*, páginas 195–238, 1 2021. Acesso em: 27 de Novembro de 2024.
- [3] Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020 I, 2020. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/53-2020-137618093>.
- [4] Resolução do Conselho de Ministros n.º 149/2024 , 2024. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/149-2024-893982647>.
- [5] Centro da Biomassa. PNEC 2030 em revisão até 2024 quer 80% de energias renováveis após 2026, 2023. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: <https://centrodabiomassa.pt/pnec-2030-em-revisao-ate-2024-quer-80-de-energias-renovaveis-apos-2026>.
- [6] Fiseha Mekonnen Guangul e Girma T. Chala. Solar energy as renewable energy source: SWOT analysis. *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City, ICBDS 2019*, 2 2019. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024.
- [7] Isabel Apolinário. PNEC 2030 | O desafio da Comercialização. 2023. Acesso em: 10 de Dezembro de 2024. URL: https://www.erse.pt/media/4ekfmeuv/apresentacaoerse_acem_el_20231108.pdf.
- [8] Plano de Energia e Clima 2030 com metas mais ambiciosas aprovado sem votos contra no Parlamento, 2024. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc24/comunicacao/comunicado?i=plano-de-energia-e-clima-2030-com-metas-mais-ambiciosas-aprovado-sem-votos-contrano-parlamento>.
- [9] DIRETIVA (UE) 2018/ 2001, relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis, 2018. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024.
- [10] Edwin Clarke Gordon; Reynders, Deon; Wright. *Practical Modern SCADA Protocols: DNP3, 60870.5 and Related Systems*. Newnes, 2004. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [11] Aquilino Rodríguez Penin. *Sistemas SCADA*. Paraninfo, Espanha, 2007. Acesso em: 27 de Novembro de 2024.
- [12] FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: https://sigarra.up.pt/feup/pt/web_page.Inicial.

- [13] JdC – Jayme da Costa. Acesso em: 15 de Janeiro de 2025. URL: <https://www.jaymedacosta.pt/>.
- [14] THE 17 GOALS | Sustainable Development. Acesso em: 20 de Dezembro de 2024. URL: <https://sdgs.un.org/goals>.
- [15] Joseph Falco e Karen Kent. Guide to Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) and Industrial Control Systems Security, 2006. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024.
- [16] What are the 5 Levels of Automation?, 2021. Acesso em: 4 de Dezembro de 2024. URL: <https://integrated-controls.com/what-are-the-5-levels-of-automation>.
- [17] José Adrian Ruiz Carmona, Julio César Muñoz Benítez, e Jose L. García-Gervacio. SCADA system design: A proposal for optimizing a production line. *2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers, CONIELECOMP 2016*, páginas 192–197, 3 2016. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [18] Catarina Lucizano and Alexandre Acácio de Andrade and Júlio Francisco Blumetti Facó and Adriano Gomes de Freitas. Revisiting the Automation Pyramid for the Industry 4.0. *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2023 - Proceedings*, páginas 1195–1198, 2023. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [19] Yadong Li, Danlan Li, Wenqiang Cui, e Rui Zhang. Research based on OSI model. *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, ICCSN 2011*, páginas 554–557, 2011. Acesso em: 27 de Novembro de 2024.
- [20] OSI Model: The 7 Layers of Network Architecture, 2024. Acesso em: 4 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.bmc.com/blogs/osi-model-7-layers/>.
- [21] What is OSI Model | 7 Layers Explained, 2024. Acesso em: 4 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/open-systems-interconnection-model-osi/>.
- [22] Dale Barr e P. Fonash. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems. *National Communications System (NCS), Technical Information Bulletin*, 2004. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [23] Stuart A. Boyer. *SCADA: supervisory control and data acquisition*. 2004. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [24] Anam Sajid, Haider Abbas, e Kashif Saleem. Cloud-Assisted IoT-Based SCADA Systems Security: A Review of the State of the Art and Future Challenges. *IEEE Access*, 4:1375–1384, 2016. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [25] A Brief History of the SCADA System. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: <https://processsolutions.com/a-brief-history-of-the-scada-system/>.
- [26] These 3 SCADA Architectures below You Must Know Deeply, 2015. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://program-plc.blogspot.com/2015/09/these-3-scada-architectures-below-you.html>.
- [27] Max Lennon Müller. Sistema supervisório e aquisição de dados de uma usina de geração fotovoltaica. Tese de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Automação e Sistemas, Florianópolis, Brasil, 2017. Acesso em: 12 de Dezembro de 2024.
- [28] Behera Srinivasa Rao, Ch. Vishnu Chakravarthi, e A. Jawahar. Industrial Control Systems Security and Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, 03(10):109–118, October 2017. Acesso em: 12 de Dezembro de 2024.

- [29] Texas Instruments. Rs-485 design guide. <https://web.archive.org/web/20180517101401/http://www.ti.com/lit/sg/slyt484a/slyt484a.pdf>, 2011. Acesso em: 31 de Dezembro de 2024.
- [30] Tai hoon Kim. Integration of wireless scada through the internet. *International Journal of Computers and Communications*, 4:1–7, 2010. Acesso em: 31 de Dezembro de 2024.
- [31] Rajesh Singh Anita Gehlot Mamoon Rashid Shaik Vaseem Akram Sultan S. Alshamrani Abdullah Alshehri Ahmed Saeed AlGhamdi Gangishetty Arun Kumar, Ajay Roy. Hybrid architecture based system for the establishment of sustainable environment in a construction site with 433 mhz lora and 2.4 ghz zigbee. *Sustainability*, 14(10):6280, 2022. Acesso em: 31 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/6280>.
- [32] Kory Underdown. The intersection of 5g, public wi-fi, and network security: Who’s at risk? *DNSFilter Blog*, Junho 2024. Acesso em: 31 de Dezembro de 2024. URL: https://www.dnsfilter.com/blog/compare-5g-4g-public-wi-fi-security?utm_source=chatgpt.com.
- [33] Andrew Stuart Tanenbaum. *Computer Networks*. 1981. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [34] Arda Kocamuftuoglu, Okan Akbay, e Serkan Kaba. A comparative study on industrial communication protocols using iot platforms. *Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics*, 14:57–65, 2021. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [35] Gregor Hohpe. *Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions*. Addison-Wesley Professional, 2003. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [36] ACROMAG INCORPORATED. Introduction to modbus tcp/ip. Relatório técnico, Acromag Incorporated, 2005. Acesso em: 13 de Dezembro de 2024.
- [37] Rajkumar Buyya, Christian Vecchiola, e S. Thamarai Selvi. Principles of parallel and distributed computing. *Mastering Cloud Computing*, páginas 29–70, 1 2013. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025. doi:10.1016/B978-0-12-411454-8.00002-4.
- [38] Maarten Wijnants, Patrick Monsieurs, e Wim Lamotte. Improving the user quality of experience by incorporating intelligent proxies in the network. Relatório técnico TR-UH-EDM-0502, Expertise Centre for Digital Media, Limburgs Universitair Centrum, Wetenschapspark 2, B-3590 Diepenbeek, 2005. Acesso em: 27 de Dezembro de 2024. URL: <http://www.edm.luc.ac.be/>.
- [39] Eric Conrad, Seth Misenar, e Joshua Feldman. Chapter 7 - domain 6: Security architecture and design. Em Eric Conrad, Seth Misenar, e Joshua Feldman, editores, *CISSP Study Guide (Second Edition)*, páginas 257–306. Syngress, Boston, second edition edição, 2012. Acesso em: 27 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781597499613000078>, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-59749-961-3.00007-8>.
- [40] Microsoft Learn. Azure architecture center, 2024. Acesso em: 17 de Dezembro de 2024. URL: <https://learn.microsoft.com/pdf?url=https%3A%2F%2Flearn.microsoft.com%2Fen-us%2Fazure%2Farchitecture%2Ftoc.json>.
- [41] Jyoti Deogirikar e Amarsinh Vidhate. An improved publish-subscribe method in application layer protocol for iot. *Proceedings of the 2017 International Conference On Smart Technology for Smart Nation, SmartTechCon 2017*, páginas 1070–1075, 5 2018. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025. doi:10.1109/SMARTTECHCON.2017.8358534.
- [42] Comissão Europeia. Regulamento (UE) 2016/631 — Requisitos para a Conexão de Instalações de Produção à Rede Elétrica, 2016. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: https://www.erse.pt/media/eygda1k0/regulamento-ue-2016-631-rfg-nc_pt.pdf.

- [43] Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG). Produção de Energia Elétrica, 2024. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energia-eletrica/producao-de-energia-eletrica/>.
- [44] Unidades de Pequena Produção (UPP/MP/MN). Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energia-eletrica/producao-de-energia-eletrica/producao-descentralizada-autoconsumo-e-upp-mp-mn/unidades-de-pequena-producao-upp-mp-mn/>.
- [45] UPP - SOLVasto. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://solvasto.pt/upp/>.
- [46] Agência para a Energia (ADENE). Manual Digital: Autoconsumo e Comunidade de Energia Renovável — Guia Legislativo, 2022. Acesso em: 11 de Dezembro de 2024. URL: https://www.adene.pt/wp-content/uploads/2022/11/Manual-Digital-Autoconsumo-e-Comunidade-de-Energia-Renovavel-Guia-Legislativo_vs2.pdf.
- [47] UPAC - SOLVasto. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://solvasto.pt/upac/>.
- [48] BESS: Battery Energy Storage Systems, 2024. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/armazenamento/bess>.
- [49] Galp vai instalar baterias e armazenar energia na central de alcoutim. *Barlavento*, 2024. Acesso em: 30 de Dezembro 2024. URL: <https://www.barlavento.pt/galp-vai-instalar-baterias-e-armazenar-energia-na-central-de-alcoutim/>.
- [50] EDP. Edpr coloca em operação primeiro parque híbrido da península ibérica com energia solar e eólica, 2024. Acesso em: 30 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.edp.com/pt-pt/noticias/edpr-coloca-em-operacao-primeiro-parque-hibrido-da-peninsula-iberica-com-energia-solar-e>.
- [51] Jayme da Costa. Powered by know-how - energia e armazenamento, 2024. Acesso em: 30 de Dezembro de 2024. URL: https://www.linkedin.com/posts/jayme-da-costa_poweredbyknowhow-energy-energia-activity-7207021585948372992-oBDL/?originalSubdomain=pt.
- [52] Stephen Peake. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press, 4th edição, 2018. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [53] Naggar Saad, Ahmed Elssatar, e Amr saleh. Grid connected photovoltaic using multi level inverter. 4, 09 2018. Acesso em: 27 de Novembro de 2024.
- [54] Monocrystalline vs Polycrystalline: Which Solar Panel is Better?, 2024. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.geothermhvac.com/mono-vs-poly-better/>.
- [55] Monocristalino vs Policristalino, 2019. Acesso em: 4 de Dezembro de 2024. URL: <https://hepel.com.br/monocristalino-vs-policristalino>.
- [56] Indhirha Deckmann. Análise de parâmetros de módulos bifaciais em diferentes irradiâncias e temperaturas, 2024. Acesso em: 27 de Novembro de 2024.
- [57] Bifacial Solar Panels: Everything You Need to Know, 2024. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: https://www.renogy.com/blog/bifacial-solar-panels-disadvantages-and-advantages/?srsltid=AfmBOooAomBjZie5lb6pYmY_QPZaYDqMj_bX_wEerlaIapvQY6Y3Mkbn.

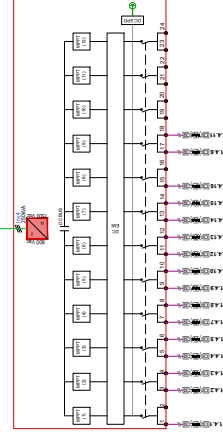
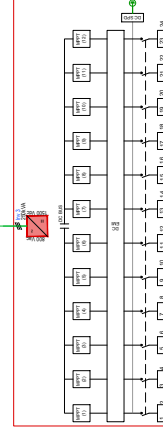
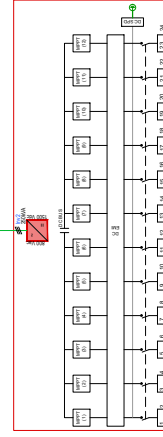
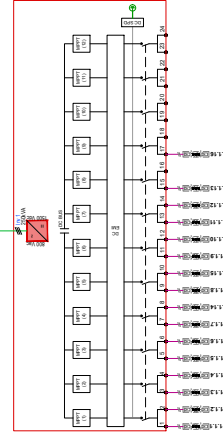
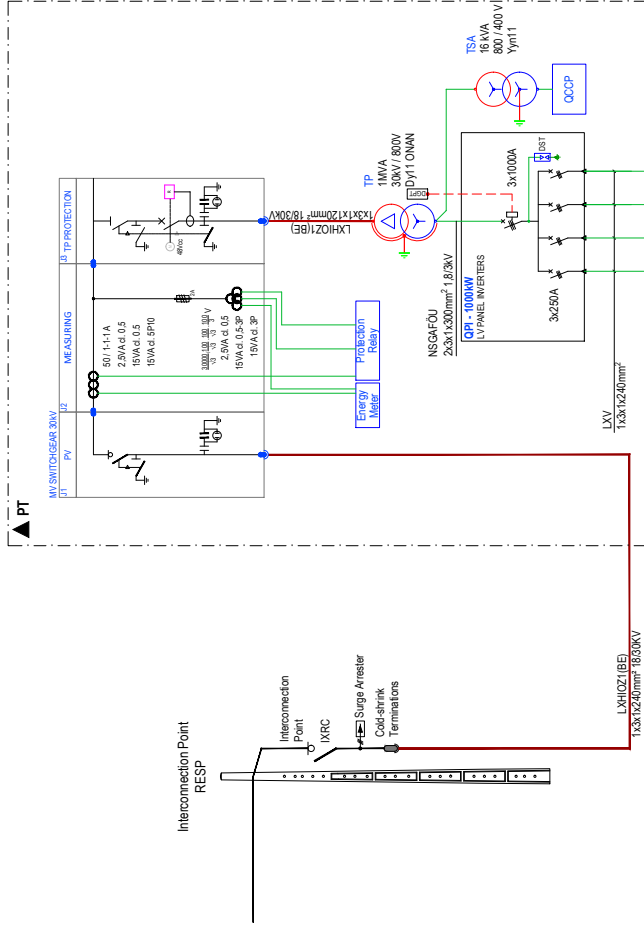
- [58] Guia para ajustar a orientação dos painéis solares leste-oeste - Blog Damia Solar. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.damiasolar.com/blog/pt/guia-para-ajustar-a-orientacao-dos-paineis-solares-leste-oeste/>.
- [59] Mehmet Ali Yildirim. Maximum power point tracking techniques for solar photovoltaic applications. Tese de mestrado, Cracow University of Technology, 2020. Acesso em: 19 de Dezembro de 2024.
- [60] inverter.com. What is the String Solar Inverter? Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.inverter.com/what-is-the-string-solar-inverter>.
- [61] Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Acesso em: 10 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.ipma.pt/pt/index.html>.
- [62] Youfu Lv, Xuewen Geng, Weiming Luo, Tianying Chu, Haonan Li, Daifei Liu, Hua Cheng, Jian Chen, Xi He, e Chuanchang Li. Review on influence factors and prevention control technologies of lithium-ion battery energy storage safety. *Journal of Energy Storage*, 72:108389, 11 2023. Acesso em: 19 de Dezembro de 2024.
- [63] Dao Gang Peng, Hao Zhang, Li Yang, e Hui Li. Design and realization of modbus protocol based on embedded linux system. *Proceedings - The 2008 International Conference on Embedded Software and Systems Symposia, ICESS Symposia*, páginas 275–280, 2008. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [64] K. Hänsch, A. Naumann, C. Wenge, e M. Wolf. Communication for battery energy storage systems compliant with iec 61850. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 103:577–586, 12 2018. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.
- [65] Wenye Wang e Zhuo Lu. Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. *Computer Networks*, páginas 1344–1371, 4 2013. Acesso em: 13 de Dezembro de 2024.
- [66] Petr Matoušek. Description and analysis of iec 104 protocol. Technical Report FIT-TR-2017-12, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, December 2017. Acesso em: 2 de Janeiro de 2025.
- [67] PROFIBUS - Siemens Global, 2024. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/profibus.html>.
- [68] Peter Drahoš e Igor Bélai. The profibus protocol observation. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(11):258–263, 2012. Acesso em: 20 de Dezembro de 2024.
- [69] From profibus to profinet, 2024. Acesso em: 17 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/profinet/pb-2-pn.html>.
- [70] iGrid TD. What is the DLMS protocol?, 2025. Acesso em: 10 de Janeiro de 2025. URL: <https://www.igrid-td.com/smartguide/communicationprotocols/dlms/#cybersecurity|2>.
- [71] Energy management for a photovoltaic power plant based on SCADA system. *Proceedings of the 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2021*, 7 2021. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [72] Sma AG Solar Technology. Performance ratio - factor de qualidade para o sistema fotovoltaico. Acesso em: 15 de Janeiro de 2025. URL: <https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-pt-11.pdf>.

- [73] The Network DNA. Vpn vs. firewall: Decoding the essential components of network security. Acesso em: 3 de Janeiro de 2025. URL: <https://www.thenetworkdna.com/2023/12/vpn-vs-firewall-decoding-essential.html>.
- [74] Nishkar R. Naraindath, Halleluyah A. Kupolati, Ramesh C. Bansal, e Raj M. Naidoo. Chapter fourteen - data security and privacy, cyber-security enhancement, and systems recovery approaches for microgrid networks. Em *Modeling and Control Dynamics in Microgrid Systems with Renewable Energy Resources*, páginas 377–401. Academic Press, 2024. Acesso em: 3 de Janeiro de 2025.
- [75] IDS x IPS, 2024. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.checkpoint.com/pt/cyber-hub/network-security/what-is-an-intrusion-detection-system-ids/ids-vs-ips/>.
- [76] Rashmi Bhardwaj. Difference between IPS and IDS. Acesso em: 15 de Janeiro de 2025. URL: <https://ipwithease.com/difference-between-ips-and-ids-in-network-security/>.
- [77] Huseyin Temucin, Ali Seydi Keceli, Aydin Kaya, Hamdi Yalin Yalic, e Bedir Tekinerdogan. A Cloud-Based Big Data System to Support Visually Impaired People. *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*, páginas 1–22, 1 2018. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [78] Md Sadek Ferdous, Kamanashis Biswas, Mohammad Javed Morshed Chowdhury, Niaz Chowdhury, e Vallipuram Muthukkumarasamy. *Integrated platforms for blockchain enablement*, volume 115, páginas 41–72. Elsevier, 1 2019. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [79] Krista Sorri, Navonil Mustafee, e Marko Seppänen. Revisiting IoT definitions: A framework towards comprehensive use. *Technological Forecasting and Social Change*, 179:121623, 6 2022. Acesso em: 6 de Janeiro de 2025.
- [80] Huseyin Temucin, Ali Seydi Keceli, Aydin Kaya, Hamdi Yalin Yalic, e Bedir Tekinerdogan. Chapter 1 - a cloud-based big data system to support visually impaired people. Em Arun Kumar Sangaiah, Michael Sheng, e Zhiyong Zhang, editores, *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*, páginas 1–22. Academic Press, 2018. Acesso em: 8 de Janeiro de 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128133149000013>.
- [81] Elan Witkowski e Thomas Ward. Artificial intelligence assisted surgery. *Artificial Intelligence in Healthcare*, páginas 179–202, 1 2020. Acesso em: 27 de Novembro de 2024.
- [82] M. J. Perez-Molina, D. M. Larruskain, P. Eguia Lopez, G. Buigues, e V. Valverde. Review of protection systems for multi-terminal high voltage direct current grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144:111037, 7 2021. Acesso em: 27 de Novembro de 2024.
- [83] Mohammad Ghiasi, Taher Niknam, Zhanle Wang, Mehran Mehrandezh, Moslem Dehghani, e Noradin Ghadimi. A comprehensive review of cyber-attacks and defense mechanisms for improving security in smart grid energy systems: Past, present and future. *Electric Power Systems Research*, 215:108975, 2 2023. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024.
- [84] Ruizhi Zhong, Cyrus Salehi, e Ray Johnson. Machine learning for drilling applications: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 108:104807, 12 2022. Acesso em: 19 de Dezembro de 2024.
- [85] Hongfang Lu, Lijun Guo, Mohammadamin Azimi, e Kun Huang. Oil and gas 4.0 era: A systematic review and outlook. *Computers in Industry*, 111:68–90, 10 2019. Acesso em: 19 de Dezembro de 2024.

- [86] What are the 5 V's of Big Data?, 2023. Acesso em: 6 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.techtarget.com/searchdatamanagement/definition/5-Vs-of-big-data>.
- [87] OPC Foundation. What is opc?, 2025. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025. URL: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>.
- [88] Simon Sommer. The abcs of opc ua: Everything you need to understand, 2024. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025. URL: <https://www.realpars.com/blog/opc-ua-basics>.
- [89] Andreas Eckhardt, Sebastian Muller, e Ludwig Leurs. An evaluation of the applicability of opc ua publish subscribe on factory automation use cases. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 2018-September:1071–1074, 10 2018. Acesso em: 7 de Janeiro de 2025.

Anexo A

Esquema Unifilar de uma Central Fotovoltaica Genérica



LEGEND	
	LOW VOLTAGE CABLE (A.C.) LV 3x 1x50mm ²
	LOW VOLTAGE CABLE (D.C.) SOLAR 2x 16mm ²
	STRING OF 28 MODULES

[illegible]

Anexo B

Arquitetura de Comunicações de uma Central Fotovoltaica Genérica

