

Monitorização de Recursos em Ambiente Fabril

AUGUSTO ULISSES TERROSO DA SILVA
Setembro de 2025

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Monitorização de Recursos em Ambiente Fabril

Augusto Ulisses Terroso da Silva

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Setembro, 2025

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Automação e Sistemas.

Candidato: Augusto Ulisses Terroso da Silva, N.º 1180891,
1180891@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Prof. Carlos Felgueiras, mcf@isep.ipp.pt

Empresa: Bosch Security Systems - Sistemas de Segurança, S.A

Orientador: Eng. Paulo Teixeira, paulo.teixeira@keenfinity-group.com



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Setembro, 2025

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão à equipa de Facility Management da Bosch Security Systems, em especial ao Eng. Paulo Teixeira, Eng. Raul Nora, Eng. Pedro Gonçalves, Eng. Pedro Reis, Eng.^a Diana Gonçalves, Eng.^a Filipa Fontes e Eng. Daniel Cruz. A oportunidade de realizar o estágio no âmbito desta dissertação, bem como todo o apoio, amizade e orientação que me proporcionaram, foram fundamentais para o desenvolvimento do projeto e tornaram a minha experiência na empresa extremamente enriquecedora e memorável.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor Carlos Felgueiras pelo seu acompanhamento, orientação e partilha de conhecimento e experiências, que constituíram um contributo fundamental para a concretização desta etapa do meu percurso académico.

Não poderia deixar de agradecer à minha família, à minha namorada e a todos os meus amigos, pelo incentivo constante, confiança e carinho, elementos indispensáveis para a realização desta dissertação e para o sucesso da minha jornada académica.

Resumo

A Bosch Security Systems, localizada em Ovar, utiliza nas suas instalações diversos recursos essenciais ao funcionamento industrial, nomeadamente energia elétrica, ar comprimido, azoto e água, cujo custo agregado ascende, em média, a 90 000 € mensais. Atualmente, o consumo destes recursos é registado apenas de forma global, impossibilitando identificar detalhadamente as áreas, departamentos ou equipamentos com maior utilização ou consumos atípicos. Esta limitação compromete a gestão eficiente dos recursos, dificulta a identificação de oportunidades de melhoria e inviabiliza a imputação rigorosa de custos.

A implementação de um sistema de monitorização de recursos permitiria desagregar os consumos, proporcionando uma visão detalhada de cada recurso, desde o consumo global das instalações até aos consumos individuais de cada equipamento. Esta abordagem possibilita ganhos significativos, nomeadamente a otimização do uso dos recursos, a redução de custos e a melhoria na gestão de equipamentos e infraestruturas. Adicionalmente, permite antecipar eventuais avarias mediante a identificação de padrões anómalos de consumo, bem como atribuir os custos de forma proporcional à utilização de recursos por departamento da empresa.

O presente trabalho endereça parcialmente este problema através do desenvolvimento e implementação de um sistema de monitorização de energia elétrica, ar comprimido e azoto nas diferentes áreas do parque industrial da empresa. A solução concebida procurou alinhar-se com os princípios definidos pela norma ISO 50001, que estabelece boas práticas para a gestão eficiente da energia.

Os resultados obtidos demonstram a relevância e a aplicabilidade da abordagem proposta, contribuindo não apenas para a melhoria da eficiência energética, da sustentabilidade e da competitividade da organização, mas também para o seu alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-Chave: Monitorização de Consumos, Ambiente Industrial, Energia Elétrica, Azoto, Ar Comprimido, Modbus, SCADA, PowerStudio.

Abstract

Bosch Security Systems, located in Ovar, utilizes several essential resources for industrial operations, namely electricity, compressed air, nitrogen, and water, with an average combined cost of €90,000 per month. Currently, the consumption of these resources is recorded only at a global level, making it impossible to identify in detail the areas, departments, or equipment with the highest usage or atypical consumption patterns. This limitation hinders efficient resource management, complicates the identification of improvement opportunities, and prevents accurate cost allocation.

The implementation of a resource monitoring system would allow the disaggregation of consumption, providing a detailed view of each resource, from the overall facility consumption to the individual consumption of each piece of equipment. This approach enables significant benefits, including resource use optimization, cost reduction, and improved management of equipment and infrastructure. Additionally, it allows for the anticipation of potential failures by identifying anomalous consumption patterns, as well as assigning costs proportionally to resource usage by each company department.

This work partially addresses this issue through the development and implementation of a monitoring system for electricity, compressed air, and nitrogen across different areas of the company's industrial park. The proposed solution aimed to align with the principles defined by ISO 50001, which establishes best practices for efficient energy management.

The results obtained demonstrate the relevance and applicability of the proposed approach, contributing not only to improved energy efficiency, sustainability, and organizational competitiveness but also to alignment with the Sustainable Development Goals.

Keywords: Monitoring of Consumption, Industrial Facilities, Electric Energy, Nitrogen, Compressed Air, Modbus, SCADA, PowerStudio.

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	2
1.2 Objetivos do Trabalho	3
1.3 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	3
1.4 Apresentação da Empresa	6
1.4.1 Grupo Bosch	6
1.4.2 Bosch Ovar	7
1.5 Calendarização do Trabalho	7
1.6 Organização do Relatório	8
2 Revisão Bibliográfica	11
2.1 Caso 1 - Sistema de Monitorização numa Fábrica Automóvel	11
2.2 Caso 2 - Sistema de Monitorização de Energia numa Fábrica Biomédica	13
2.3 Caso 3 - Monitorização de Consumos Energéticos em Edifícios Hos- pitalares	15
2.4 Caso 4 - Sistema de Monitorização de Energia com Aplicação no De- partamento de Energia Elétrica da Universidade Gazi	17
2.5 Caso 5 - Sistema de Monitorização com Tecnologia de Comunicação Sem Fios	19
2.6 Análise Comparativa dos Casos de Estudo	22
3 Conceitos Fundamentais	23
3.1 Gestão e Monitorização de Energia	23
3.2 Norma ISO 50001	25
3.2.1 Método Plan-Do-Check-Act	25
3.3 Sistema SCADA	26
3.3.1 Componentes do sistema SCADA	26
3.3.2 Evolução da arquitetura dos sistemas SCADA	27

3.4	Modbus	28
3.4.1	Modbus RTU	32
3.4.2	Modbus ASCII	33
3.4.3	Modbus TCP	33
3.5	RS-485	35
3.6	Ethernet	37
3.7	Equipamentos de Monitorização	38
3.7.1	Analisadores de energia	38
3.7.2	Transformadores de intensidade	39
3.7.3	Conversores TCP/IP	42
3.7.4	Sensores de caudal	43
3.8	Servidores	45
4	Caso de Estudo	47
4.1	Descrição das Instalações	47
4.2	Apresentação dos Processos Produtivos	48
4.2.1	Processo Surface Mount Technology	48
4.2.2	Processo Through Hole Technology	53
4.2.3	Processo Final Assembly	55
4.3	Caracterização das Infraestruturas	56
4.3.1	Rede elétrica	56
4.3.2	Rede de ar comprimido	65
4.3.3	Rede de azoto	67
4.4	Requisitos do Sistema	69
4.4.1	Estudo da instalação	70
4.4.2	Requisitos iniciais	70
4.4.3	Requisitos posteriores	71
4.5	Proposta de Solução	72
5	Implementação do Projeto	75
5.1	Hardware do Sistema Implementado	75
5.1.1	Arquitetura do sistema	76
5.1.2	Justificação da solução adotada	78
5.1.3	Representação dos pontos monitorizados	78
5.1.4	Barramentos de comunicação	83
5.1.5	Parametrização dos equipamentos	85
5.1.6	Execução das atividades planeadas	89
5.2	Software do Sistema Implementado	90
5.2.1	Caracterização do PowerStudio	91
5.2.2	Desenvolvimento e configuração	93

6	Validação da Solução	103
6.1	Validação Contra Objetivos	103
6.2	Validação Institucional	104
6.2.1	Funcionalidades	104
6.3	Análise de Resultados	114
6.3.1	Meios utilizados	114
6.3.2	Desafios na implementação	116
6.3.3	Identificação de eventos	117
7	Conclusões	121
7.1	Propostas de Trabalho Futuro	122
	Referências	124
	Anexo A Parque Industrial	137
A.1	Layout da Fábrica	137
A.2	Sistema de Ar Comprimido	138
	Anexo B Barramentos da Rede de Comunicação	139
B.1	Barramento 1 - PT	140
B.2	Barramento 2 - SMT	141
B.3	Barramento 3 - PT + SMT	142
B.4	Barramento 4 - FAS + CSI	143
B.5	Barramento 5 - WHS + CAB	144
B.6	Barramento 6 - ESC	145
	Anexo C Parametrização de Equipamentos	147
C.1	Analisadores de Energia	147
C.1.1	Configuração da Relação de Transformação	147
C.1.2	Configuração da Comunicação da rede Modbus	148
C.2	Conversores TCP/IP	148
C.2.1	Configuração da Rede Ethernet	148
C.2.2	Configuração dos Parâmetros de Comunicação da Rede Modbus	149

Lista de Figuras

1.1	Representação dos SDG; adaptado de [11].	4
1.2	Princípios fundamentais dos SDG; adaptado de [15].	5
1.3	Visão estratégica de sustentabilidade do Grupo Bosch; adaptado de [23].	6
1.4	Vista aérea da Bosch Security Systems.	7
1.5	Calendarização - gráfico de Gantt.	9
2.1	Arquitetura da rede do sistema de monitorização [24].	12
2.2	<i>Dashboard</i> do <i>software</i> SCADA [24].	13
2.3	Estrutura de transparência na visualização do consumo energético [25].	15
2.4	Arquitetura do sistema de monitorização de energia [26].	16
2.5	Comparação do consumo energético semanal nos períodos de inverno e verão [26].	17
2.6	Arquitetura do sistema de monitorização de energia; adaptado de [27].	18
2.7	Relatório dos valores da corrente [27].	19
2.8	Arquitetura do sistema proposto; adaptado de [28].	21
2.9	Dados disponíveis no Google Sheets; adaptado de [28].	22
3.1	Arquitetura de um SGE; adaptado de [30].	24
3.2	Componentes de um sistema SCADA; adaptado de [38].	27
3.3	Redes de comunicação Modbus; adaptado de [42], [43].	29
3.4	Modos de comunicação Modbus; adaptado de [48].	30
3.5	Estrutura geral de uma mensagem Modbus; adaptado de [47].	30
3.6	Estrutura da mensagem Modbus RTU; adaptado de [55].	32
3.7	Estrutura da mensagem Modbus ASCII; adaptado de [55].	33
3.8	Estrutura da mensagem Modbus TCP; adaptado de [42], [53].	34
3.9	Topologia do Modbus TCP; adaptado de [61].	35
3.10	Barramento RS-485; adaptado de [68].	36
3.11	Relação da velocidade e o comprimento do cabo de comunicação RS-485; adaptado de [69].	36
3.12	Transmissão assíncrona de dados em série; adaptado de [64].	37
3.13	Exemplo de um analisador de energia - PM5110 [72].	39
3.14	Aplicação do TI para medição; adaptado de [79].	40

3.15	TI do tipo janela; adaptado de [79].	41
3.16	Aplicação de um conversor TCP/IP; adaptado de [83].	43
3.17	Tipos de sensores de caudal; adaptado de [85].	44
4.1	Estrutura convencional de uma linha de montagem SMT; adaptado de [91].	49
4.2	Diagrama do processo SMT.	49
4.3	Máquina utilizada na passagem de pasta - <i>Printer</i>	49
4.4	Dispositivo utilizado na inspeção da pasta - SPI.	50
4.5	Máquina <i>Pick and Place</i>	51
4.6	Forno de refluxo.	51
4.7	Equipamento utilizado na inspeção final do PCB - AOI.	52
4.8	<i>Layout</i> atual das linhas SMT no chão de fábrica.	53
4.9	<i>Layout</i> futuro das linhas SMT no chão de fábrica.	53
4.10	Diagrama do processo THT.	54
4.11	Exemplo de <i>multiboard</i> proveniente do processo SMT [96].	54
4.12	Tipos de soldadura no processo THT; adaptado de [97], [98], [99].	55
4.13	Diagrama do processo FAS.	56
4.14	Localização dos QGBT no PT.	57
4.15	Representação do funcionamento das UPS instaladas; adaptado de [100].	58
4.16	Novo modelo de nomenclatura dos quadros elétricos.	59
4.17	Painéis instalados na cobertura da área de produção.	60
4.18	Inversores instalados no PT.	61
4.19	<i>Dashboard</i> do <i>software</i> do sistema fotovoltaico.	63
4.20	Dados em tempo real dos dispositivos.	64
4.21	Consumo de energia elétrica face à produzida na UPAC.	64
4.22	Exemplo de um sistema de produção de ar comprimido; adaptado de [101].	65
4.23	Compressores instalados no caso de estudo.	66
4.24	Localização do depósito de azoto no parque industrial.	68
4.25	Sistema de telemetria do nível de azoto no depósito.	69
4.26	Solução existente no caso de estudo.	72
4.27	Solução proposta para a implementação do projeto.	73
4.28	Configuração das funcionalidades do <i>software</i>	74
5.1	Arquitetura do sistema.	76
5.2	Parametrização da relação de transformação dos analisadores de energia.	86
5.3	Parametrização da comunicação da rede Modbus dos analisadores de energia.	86

5.4	Parametrização do valor do diâmetro interno da tubagem do caudalímetro.	87
5.5	<i>Display</i> do caudalímetro.	88
5.6	Arquitetura do <i>software</i> PowerStudio; adaptado de [105].	92
5.7	Configuração do motor do programa.	93
5.8	Exportação das configurações efetuadas para a aplicação.	93
5.9	Adicionar um equipamento de primeiro nível.	94
5.10	Configuração dos parâmetros de um equipamento de primeiro nível.	95
5.11	Adicionar um equipamento de segundo nível.	95
5.12	Configuração de um analisador de energia.	96
5.13	Configuração da relação de transformação dos TI de um analisador de energia.	96
5.14	Configuração de um equipamento genérico Modbus.	97
5.15	Cabeçalho de edição dos ecrãs SCADA.	97
5.16	Elaboração de um novo ecrã SCADA.	98
5.17	Janela de criação e personalização de ecrãs SCADA.	98
5.18	<i>Dashboard</i> do <i>software</i> de visualização.	99
5.19	Cabeçalho de edição dos relatórios.	100
5.20	Elaboração de um novo relatório.	100
5.21	Janela de criação e personalização de relatórios.	101
5.22	Relatório de consumos de energia elétrica.	101
6.1	Equipamentos monitorizados através do <i>software</i>	105
6.2	Legenda dos símbolos de estado dos equipamentos no <i>software</i>	105
6.3	<i>Dashboard</i> do <i>software</i> de monitorização.	106
6.4	Consumo instantâneo de energia elétrica nas diversas áreas.	107
6.5	Consumo instantâneo de energia elétrica na área OVR109.	108
6.6	Consumo instantâneo de energia elétrica nas linhas SMT.	108
6.7	Consumo instantâneo de energia elétrica dos restantes quadros elétricos da área OVR109.	109
6.8	Consumos instantâneos nos equipamentos de ar comprimido.	110
6.9	Ecrã do <i>software</i> dedicado à gestão do azoto.	111
6.10	Produção de energia elétrica através das UPAC.	111
6.11	Ecrã dos indicadores de <i>performance</i> de energia.	112
6.12	Relatório de custos de energia elétrica num dado período.	113
6.13	Gráfico do consumo total de energia elétrica num dado período.	114
6.14	Consumo atípico na linha SMT3.	117
6.15	Inexistência de produção na UPAC2.	118
6.16	Consumo de ar comprimido na semana de paragem.	119
6.17	Consumo de ar comprimido com o <i>standby</i> dos secadores.	120

Lista de Tabelas

2.1	Exemplos de operações avaliadas quanto à necessidade de medição; adaptado de [25].	14
3.1	Códigos de função mais comuns; adaptado de [44].	31
3.2	Classes de precisão dos TI para monitorização; adaptado de [76]. . .	42
3.3	Classes de precisão dos TI para proteção; adaptado de [76].	42
4.1	Exemplos de alterações nas nomenclaturas de alguns quadros elétricos.	60
4.2	Características da UPAC instalada.	61
4.3	Características da UPAC nova.	62
4.4	Características dos compressores instalados.	66
4.5	Impacto das fugas identificadas.	67
5.1	Características técnicas dos equipamentos a reaproveitar.	79
5.2	Circuitos definidos para a implementação dos equipamentos a reaproveitar.	80
5.3	Definição dos novos pontos de monitorização.	81
5.4	Características do circuito a monitorizar de ar comprimido.	82
5.5	Modelos de caudalímetros propostos para o circuito de ar comprimido.	82
5.6	Características dos circuitos a monitorizar de azoto.	83
5.7	Modelos de caudalímetros propostos para os circuitos de azoto. . . .	83
5.8	Características dos barramentos de comunicação.	85
5.9	Parâmetros de configuração dos conversores TCP/IP implementados.	88
5.10	Material adquirido para a implementação do projeto.	89
5.11	Cronograma da implementação do projeto.	90

Lista de Acrónimos

ADU	<i>Application Data Unit</i>
AOI	<i>Automated Optical Inspection</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BMS	<i>Building Management System</i>
bps	<i>Bits Per Second</i>
BT	<i>Baixa Tensão</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CRLF	<i>Carriage Return - Line Feed</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
EN	<i>European Norm</i>
ESOS	<i>Energy Smart Optimization System</i>
FAS	<i>Final ASsembly</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
Gb/s	<i>GigaBytes per Second</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet Of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>

ISO	<i>International Standards Organization</i>
IT	<i>Information Technology</i>
kbps	<i>KiloBits Per Second</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
kWp	<i>KiloWatt Peak</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LoRa	<i>LOng RAnge</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide Area Network</i>
LRC	<i>Longitudinal Redundancy Check</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
Mb/s	<i>MegaBytes per Second</i>
MBAP	<i>ModBus Application Protocol</i>
Mbps	<i>MegaBits Per Second</i>
MDG	<i>Millennium Development Goals</i>
MQTT	<i>Message Queue Telemetry Transport</i>
MT	<i>Média Tensão</i>
MTU	<i>Master Terminal Unit</i>
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
OPC	<i>Open Platform Communications</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PAMPD	<i>Power Analyzer Monitor and Programming Device</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PT	<i>Posto de Transformação</i>

QG	Quadro Geral
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
QP	Quadro Parcial
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i>
SGE	Sistema de Gestão de Energia
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SMT	<i>Surface Mount Technology</i>
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
SPI	<i>Solder Paste Inspection</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
THT	<i>Through Hole Technology</i>
TI	Transformador de Intensidade
TTN	<i>The Things Network</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UPAC	Unidade de Produção para AutoConsumo
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

Capítulo 1

Introdução

A indústria constitui um dos setores de maior impacto energético à escala global, representando, segundo a *International Energy Agency* (IEA), cerca de 32% do consumo total de energia nos países pertencentes à *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD). Esta realidade evidencia o papel fundamental que o setor industrial desempenha não apenas no desenvolvimento económico, mas também no contexto ambiental, nomeadamente no que se refere às emissões de gases com efeito de estufa e à utilização intensiva de recursos [1], [2].

Com a crescente complexidade dos sistemas industriais e a pressão para alcançar padrões mais elevados de eficiência e sustentabilidade, torna-se essencial a implementação de mecanismos de monitorização rigorosa e sistemática dos consumos energéticos. Entre os recursos mais críticos em ambiente fabril encontram-se a energia elétrica, o ar comprimido e o azoto. Embora com aplicações distintas, estes três vetores partilham uma característica comum: a sua gestão ineficiente pode conduzir a perdas significativas, tanto do ponto de vista económico como ambiental [3].

O ar comprimido, por exemplo, representa tipicamente entre 10% e 30% do consumo total de energia elétrica de uma instalação industrial, sendo frequentemente marcado por ineficiências, fugas e utilização excessiva. Por outro lado, o azoto desempenha um papel estratégico em processos que exigem atmosferas inertes, purgas ou conservação de produtos sensíveis. A gestão adequada destes recursos assume, portanto, particular relevância no desempenho sustentável das indústrias [4], [5].

A implementação de sistemas de monitorização em tempo real permite a identificação de padrões de consumo, a deteção precoce de anomalias e o diagnóstico

das respetivas causas, tais como falhas de equipamentos, utilização inadequada de recursos ou ineficiências nos processos produtivos. Além disto, promove uma cultura de consciencialização energética e incentiva a adoção de práticas mais sustentáveis e eficientes por parte dos utilizadores. Efetivamente, a monitorização de recursos visa melhorar os aspetos económicos, ambientais e sociais da entidade em causa [6], [7].

1.1 Contextualização

A Bosch Security Systems – Sistemas de Segurança, S.A, caracteriza-se como uma unidade fabril de grande dimensão e um consumidor intensivo de energia. Nas suas instalações são utilizados diversos recursos essenciais ao funcionamento industrial, nomeadamente energia elétrica, ar comprimido, azoto e água, cujo custo agregado ascende, em média, a 90 000 € mensais. Atualmente, o consumo destes recursos é registado apenas de forma global, o que impossibilita a identificação dos pontos de maior utilização ou de consumos atípicos, limitando a capacidade de implementar uma gestão eficiente e sustentável.

A fábrica já dispõe de alguns equipamentos de medição instalados, embora apenas uma parte esteja integrada numa rede de comunicação e monitorizada através de um *software*. Idealmente, um sistema de monitorização deveria abranger todos os pontos da instalação, permitindo obter uma visão completa dos padrões de consumo, identificar desperdícios e detetar precocemente anomalias. Contudo, esta abordagem revela-se financeiramente inviável devido ao elevado investimento necessário para aquisição e instalação do *hardware* adequado para uma monitorização integral da infraestrutura.

Neste contexto, o presente trabalho visa desenvolver e implementar um sistema de monitorização capaz de analisar, em tempo real, os consumos de energia elétrica, ar comprimido e azoto, uma vez que a água não representa um peso significativo no consumo total. Numa fase inicial, e de forma conservadora, estima-se que a implementação deste sistema permita alcançar poupanças da ordem dos 5% a 10% dos recursos monitorizados.

Para atingir estes resultados, torna-se necessário adotar uma estratégia seletiva, priorizando os pontos de maior impacto no consumo da instalação. Com a execução do presente projeto, prevê-se a implementação de 12 novos pontos de monitorização de energia elétrica, um ponto de ar comprimido e sete pontos de azoto. Adicionalmente, será imprescindível proceder à reestruturação da infraestrutura de comunicação existente, que se encontra desatualizada e sem documentação adequada, resultado das várias alterações ao *layout* da fábrica ao longo do tempo. Esta intervenção deverá ser cuidadosamente planeada e executada, garantindo uma rede robusta, escalável e compatível com os novos pontos de medição, bem como com a futura plataforma de gestão.

A plataforma de monitorização a implementar constituirá uma mais-valia significativa, permitindo a centralização dos dados recolhidos, a emissão de relatórios personalizados, a configuração de alarmes automáticos e o acesso a interfaces visuais intuitivas. Estas funcionalidades facilitarão a análise e interpretação da informação disponível, potenciando uma gestão mais eficiente dos consumos e promovendo a melhoria contínua do desempenho industrial. Além disto, o sistema deverá alinhar-se com os princípios da norma *International Standards Organization (ISO) 50001*, que define boas práticas para a gestão da energia, e contribuir para os *Sustainable Development Goals (SDG)*, incentivando práticas de eficiência energética e reforçando a sustentabilidade ambiental.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este projeto tem como principal objetivo a monitorização de recursos em ambiente fabril, através de um *software*, tais como energia elétrica, ar comprimido e azoto. Para tal, foram estabelecidos os seguintes objetivos parciais:

- Compreender as infraestruturas de suporte aos recursos a monitorizar;
- Analisar os equipamentos de medição e a rede de comunicação existentes nas instalações;
- Planear os novos pontos de monitorização a integrar no sistema;
- Avaliar o material necessário para a implementação do sistema de monitorização;
- Projetar a arquitetura da rede de comunicação do sistema de monitorização;
- Gerir e validar a execução das atividades propostas para a implementação do sistema de monitorização;
- Definir as funcionalidades essenciais a disponibilizar na plataforma de monitorização.

A compreensão e a concretização dos objetivos suprarreferidos são fundamentais para a criação de uma infraestrutura eficiente e integrada, que possibilite uma gestão precisa e sustentável dos recursos nas instalações do caso de estudo.

1.3 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

As Nações Unidas apresentaram uma agenda para o desenvolvimento sustentável mundial até 2030, aprovada por todos os estados-membros em 2015. De acordo com a Figura 1.1, esta contempla os SDG que são um conjunto de 17 objetivos e 169 alvos,

com o propósito de atingir a sustentabilidade nas dimensões: social, económica e ambiental [8], [9], [10].



Figura 1.1: Representação dos SDG; adaptado de [11].

Surgiram a partir dos *Millennium Development Goals* (MDG), definidos em 2000, alinhando os objetivos que não foram alcançados anteriormente com os novos desafios da atualidade [8], [9], [10].

O desenvolvimento sustentável procura responder às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazer as suas necessidades. Dado isto, a sustentabilidade fundamenta-se no princípio de que todos os indivíduos têm direito a uma vida melhor e digna, com base nos direitos humanos e na consciência da responsabilidade individual na preservação dos recursos naturais. Isto, pode ser alcançado através da contribuição de todas as entidades que promovam a igualdade social, proteção ambiental e prosperidade económica. Em suma, os SDG podem ser caracterizados pelos seguintes princípios ou áreas críticas, como ilustrado na Figura 1.2:

- Pessoas - acabar com a pobreza e fome de todas as formas e dimensões e assegurar que todos os indivíduos possam atingir o seu potencial com dignidade e equidade;
- Planeta - preservar os recursos naturais através de um consumo e produção sustentável e adotar medidas para combater as mudanças climáticas;
- Parcerias - mobilizar os meios necessários para o desenvolvimento sustentável, com a participação de todos os países, partes interessadas e pessoas;

- Prosperidade - assegurar que todos os seres humanos possam desfrutar de uma vida próspera e gratificante e a importância do desenvolvimento económico, social e tecnológico em conformidade com a natureza;
- Paz - promover sociedades pacíficas, justas e inclusivas, livres do medo e da violência [12], [13], [14].



Figura 1.2: Princípios fundamentais dos SDG; adaptado de [15].

Mediante as matrizes do presente relatório, é importante destacar o SDG 9, que ressalva a importância da inovação e do desenvolvimento de infraestruturas de qualidade, confiança e sustentáveis na indústria, dado que esta apresenta um papel preponderante na validação dos SDG. Efetivamente, o setor industrial é dos principais responsáveis pelo consumo energético, crescimento económico, criação de postos de trabalho e instigação na investigação e desenvolvimento de novas tecnologias. Dado isto, a inclusão de novos espaços industriais e o desenvolvimento de infraestruturas sustentáveis, visam promover, entre outros, os seguintes objetivos:

- Bem-estar dos colaboradores;
- Aumento da produtividade;
- Atenuação da pobreza;
- Inclusão social;
- Igualdade de género;
- Redução de resíduos;
- Mitigação da emissão de gases poluentes [16], [17], [18], [19].

1.4 Apresentação da Empresa

De modo a enquadrar o contexto organizacional do presente trabalho, apresenta-se em seguida uma breve caracterização do Grupo Bosch e, posteriormente, da unidade de Ovar, local onde o projeto foi desenvolvido.

1.4.1 Grupo Bosch

O ano de 1886 foi marcado pela fundação da oficina de precisão mecânica e engenharia elétrica por Robert Bosch na cidade de Estugarda. Esta foi a data de início da conceituada companhia multinacional alemã, denominada de Grupo Bosch. Esta empresa destaca-se por liderar o fornecimento de tecnologias e serviços a nível mundial, cujas operações podem ser divididas em quatro áreas de negócio: soluções de mobilidade, tecnologia industrial, bens de consumo e tecnologia de energia e construção. Efetivamente, a Bosch prioriza o desenvolvimento de produtos que sejam “*Invented for life*”, na medida que alavanquem o interesse e a qualidade de vida dos seus clientes e colabore na preservação dos recursos naturais [20], [21].

A sustentabilidade está presente na cultura da empresa como equilíbrio entre as dimensões económicas, ecológicas e sociais das atividades que fazem parte da responsabilidade corporativa. Além disto, esta permite garantir a prosperidade longínqua da organização sem comprometer os recursos que a presente e futuras gerações dispõem. Dado isto, a Bosch estabeleceu um conjunto de objetivos relativos à sustentabilidade para 2025, representados na Figura 1.3 [21], [22].

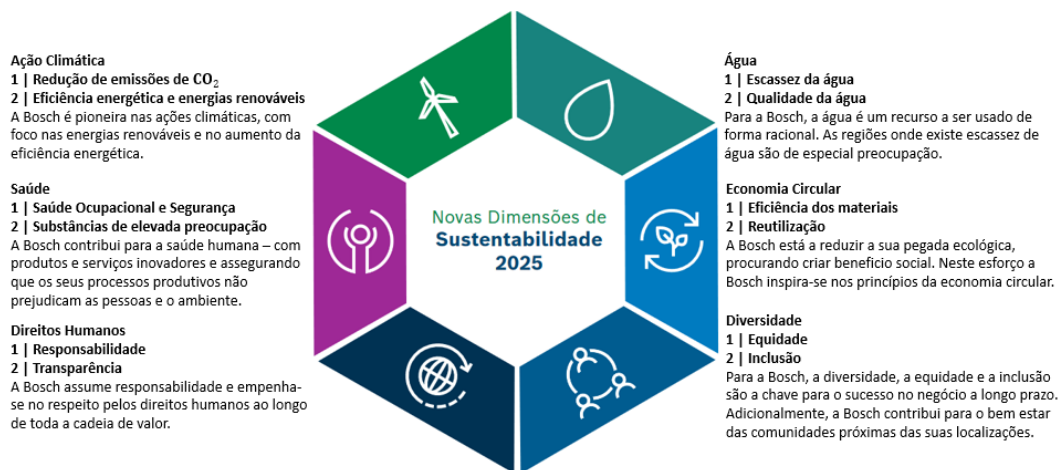


Figura 1.3: Visão estratégica de sustentabilidade do Grupo Bosch; adaptado de [23].

Este descreve as seis dimensões fundamentais para a contribuição da instituição nos desafios que a sociedade mundial enfrenta, em que cada uma é descrita com referência a dois aspetos chave [21], [22].

1.4.2 Bosch Ovar

A aquisição da divisão de Security Systems da Philips em 2002 por parte da Bosch, deu início à sua história em Ovar. Desde então, a unidade estabeleceu-se como Bosch Security Systems e encontra-se situada na zona industrial de Ovar, ocupando uma propriedade com uma área total de 96 500 m², conforme ilustrado na Figura 1.4.



Figura 1.4: Vista aérea da Bosch Security Systems.

Esta unidade integra a divisão de tecnologia de edifícios da Bosch, desenvolvendo mais de 3 000 projetos mundialmente e contando com cerca de 1 100 colaboradores. Apresenta diferentes tipos de atividades nas suas instalações, tais como, investigação, desenvolvimento, produção, logística e serviços partilhados.

A área de produção foca a sua atividade na montagem de soluções inovadoras para diversos produtos das diferentes unidades de negócio do Grupo Bosch. No que diz respeito às atividades de investigação e desenvolvimento, a integração de equipas nestas áreas na unidade em 2012, permitiu alargar o portefólio de serviços e produtos, existindo atualmente a possibilidade de contribuir para o desenvolvimento de soluções para equipamentos de videovigilância, comunicação, deteção de incêndios, controlo de acessos, ferramentas elétricas, bicicletas elétricas, entre outros. Tudo isto, contribuiu para a eclosão de tecnologias mais inteligentes e eficientes e para o crescimento da própria unidade, pelo que se encontra envolvida em diversos projetos de diferentes áreas, além da tecnologia de edifícios.

1.5 Calendarização do Trabalho

Com o objetivo de organizar e planear as diferentes fases do projeto, foi desenvolvido um plano de trabalhos que permite representar, de forma clara, a distribuição temporal das principais tarefas a realizar. Para tal, recorreu-se à elaboração de um gráfico de Gantt, apresentado na Figura 1.5, que sintetiza a calendarização das atividades previstas.

Primeiramente, são destacadas duas tarefas associadas ao estudo preliminar do caso de estudo, fundamentais para garantir o enquadramento técnico e metodológico necessário à execução do projeto. De seguida, o plano de trabalhos estrutura-se em três grupos principais de tarefas. O primeiro corresponde à vertente de investigação, indispensável para a aquisição e consolidação dos conhecimentos técnicos e científicos que sustentam tanto a implementação da solução como a elaboração do presente documento. O segundo grupo de tarefas incide sobre o desenvolvimento e a implementação prática da solução proposta, incluindo a respetiva validação. Por fim, o terceiro grupo diz respeito à redação da dissertação, tratando-se da fase mais prolongada do plano.

1.6 Organização do Relatório

O presente relatório encontra-se organizado em sete capítulos, estruturados de forma lógica e sequencial, com a finalidade de proporcionar uma apresentação coerente e compreensível do trabalho desenvolvido.

O primeiro capítulo, intitulado Introdução, enquadra o tema da dissertação, define os objetivos do projeto e apresenta a entidade envolvida, estabelecendo o ponto de partida para o desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo, dedicado à Revisão Bibliográfica, analisa casos de estudo existentes no domínio da monitorização de recursos, cuja relevância contribui para a fundamentação teórica e para o desenvolvimento da solução proposta.

O terceiro capítulo, designado Conceitos Fundamentais, reúne os principais conceitos, normas, tecnologias e ferramentas indispensáveis à compreensão e execução do projeto.

O quarto capítulo, correspondente ao Caso de Estudo, caracteriza o ambiente onde o sistema é implementado, descreve os processos produtivos relevantes, identifica os requisitos do sistema e apresenta a proposta de solução adotada.

O quinto capítulo, denominado Implementação do Projeto, detalha a execução prática do trabalho, incluindo a instalação dos componentes, a configuração dos dispositivos e a integração das ferramentas de monitorização.

O sexto capítulo, referente à Validação da Solução, avalia o desempenho da solução implementada, analisando a sua eficácia face aos objetivos e requisitos definidos, o impacto no caso de estudo e os resultados obtidos.

Por fim, o sétimo capítulo, intitulado Conclusões, apresenta as considerações finais do trabalho, a partir das quais se reflete os contributos alcançados e se propõe possíveis desenvolvimentos futuros.



Figura 1.5: Calendarização - gráfico de Gantt.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Atualmente, não existe uma solução amplamente aceita para a implementação de sistemas de monitorização de recursos em ambiente fabril, especialmente no que diz respeito às tecnologias de comunicação a adotar. Deste modo, no presente capítulo foi conduzida uma análise a diferentes casos de estudo, com o objetivo de compreender as abordagens utilizadas, desde a infraestrutura de comunicação e recolha de dados até ao seu impacto na otimização de recursos e eficiência operacional.

Seguidamente, serão apresentados exemplos de implementação de sistemas de monitorização em diferentes cenários de aplicação, bem como a análise comparativa dos casos apresentados.

2.1 Caso 1 - Sistema de Monitorização numa Fábrica Automóvel

O estudo apresentado em [24] descreve a implementação de um sistema de monitorização de energia numa fábrica automóvel no Paquistão, com o objetivo principal de melhorar a eficiência energética e reduzir desperdícios. A unidade industrial analisada é composta por mais de onze departamentos e opera com uma potência elétrica instalada de 5 MW. A implementação deste sistema resultou da dificuldade enfrentada pela equipa de engenharia em controlar eficazmente os padrões de consumo energético sem uma ferramenta apropriada [24].

A solução adotada consistiu na instalação de uma rede de *hardware* interligada a um *software* centralizado de monitorização e registo de dados, cuja arquitetura é apresentada na Figura 2.1 [24].

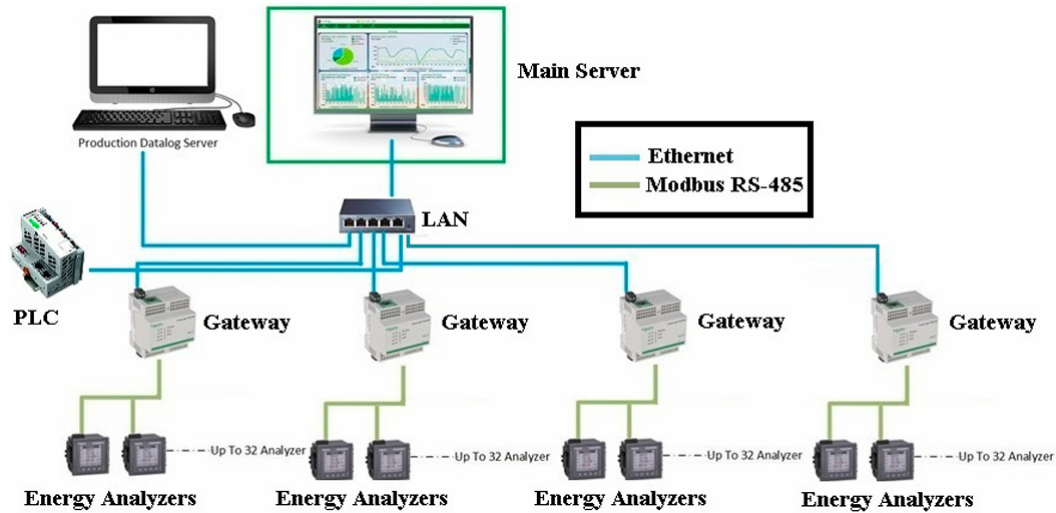


Figura 2.1: Arquitetura da rede do sistema de monitorização [24].

A comunicação dos dados foi realizada através da combinação dos protocolos Modbus e Ethernet, permitindo uma troca eficiente de informações entre os diversos componentes do sistema. A infraestrutura de monitorização foi composta por 50 analisadores de energia PM5310 da Schneider, dispositivos responsáveis pela medição de diversos parâmetros elétricos, incluindo corrente, tensão, frequência, potência ativa e reativa, energia e fator de potência, entre outros. A rede de comunicação, que se estendia por um comprimento total de 3 km, foi segmentada em quatro zonas distintas devido às características técnicas do sinal RS-485. Por sua vez, para superar essas limitações, foram implementadas *gateways* em cada uma dessas zonas, as quais permitem a conversão da comunicação por Modbus RS-485 para Ethernet, possibilitando a transmissão dos dados via *Local Area Network* (LAN) para o servidor central. Adicionalmente, foi integrado um *Programmable Logic Controller* (PLC), juntamente com módulos de entrada e saída, com o propósito de efetuar o controlo de processos, tais como o sistema de iluminação, deteção de alarmes de incêndio, dados de equipamentos de medição de água, entre outros [24].

Para a gestão e análise dos dados adquiridos, foi instalado e configurado um *software Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) no servidor central, o qual desempenha um papel fundamental na monitorização e processamento dos dados em tempo real. Todos os equipamentos foram devidamente configurados de acordo com a sua localização e apresentavam uma identificação única, permitindo uma gestão eficaz dos dados monitorizados. Além disto, foram integrados os dados dos medidores de vazão de gás, vapor, água e ar através deste *software*, com o objetivo de monitorizar os consumos de todos os recursos da fábrica. O *software*

SCADA facultava a apresentação intuitiva dos dados monitorizados através de gráficos, como ilustrado na Figura 2.2 [24].

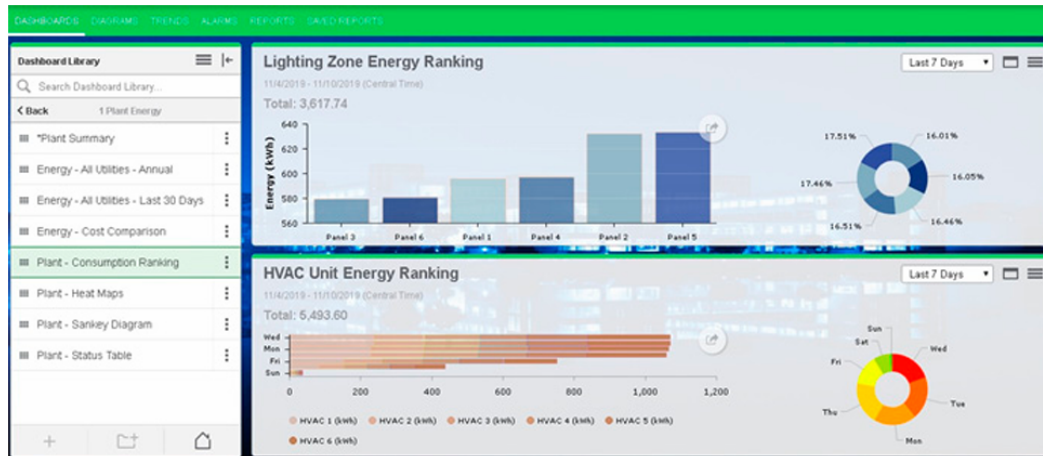


Figura 2.2: Dashboard do software SCADA [24].

Além disto, o sistema tem a capacidade de gerar relatórios automaticamente, os quais são periodicamente enviados para os endereços de *e-mail* previamente definidos [24].

Com base na análise dos dados do sistema de monitorização, foi possível identificar desperdícios de energia resultantes de falhas nas máquinas da fábrica e, principalmente, por negligência dos colaboradores, que não desligavam os equipamentos durante os intervalos, gerando um consumo desnecessário. Para mitigar esse problema, foram implementadas políticas de eficiência energética com o objetivo de manter o consumo diário de cada departamento dentro dos limites estabelecidos. Esses limites foram definidos com base nos dados do sistema de monitorização e na adoção de práticas de uso eficiente da energia durante os turnos laborais. O sistema de monitorização permitiu o acompanhamento em tempo real do consumo energético de cada departamento, apresentando esses dados nos monitores locais instalados em cada unidade, garantindo maior controlo e otimização do uso da energia [24].

O utilizador implementou as políticas de eficiência energética e monitorizou e avaliou os dados obtidos durante um ano. Como resultado, a auditoria energética anual demonstrou que a fábrica conseguiu economizar aproximadamente 7,75% dos custos com energia, refletindo o impacto positivo das políticas de eficiência energética e do sistema de monitorização [24].

2.2 Caso 2 - Sistema de Monitorização de Energia numa Fábrica Biomédica

O caso abordado em [25] refere a implementação de um sistema de monitorização de energia numa unidade industrial biomédica localizada na Irlanda. O principal

objetivo desta iniciativa foi aumentar a transparência do consumo de energia da instalação, proporcionando suporte à otimização dos processos e à redução de desperdícios. A infraestrutura elétrica da fábrica inclui três transformadores de 1 600 kVA e 15 quadros elétricos responsáveis pela alimentação das diversas áreas [25].

Com o propósito de maximizar a eficácia dos equipamentos de medição e garantir uma maior rentabilidade sobre o investimento, o caso apresentado adotou uma estratégia de seleção dos circuitos a monitorizar, tendo em conta a sua relevância no consumo energético. Assim, além da medição dos transformadores e dos quadros elétricos de distribuição, foram identificados, através de um processo de triagem com recurso a um equipamento de medição temporário, os pontos de consumo que apresentavam um perfil constante superior a 20 kW ou um perfil variável acima de 5 kW. A Tabela 2.1 apresenta exemplos de operações analisadas quanto à necessidade de medição [25].

Tabela 2.1: Exemplos de operações avaliadas quanto à necessidade de medição; adaptado de [25].

Operação	Perfil de Consumo	Potência Média (kW)	Necessidade de Medição
Milling	Variável	7,42	Sim
Coolant Pump	Constante	9,87	Não
Sand Blasting	Variável	2,84	Não
Extraction Fan	Constante	34,26	Sim
Cleanline (large)	Variável	15,31	Sim

Dada a constante reconfiguração do *layout* dos equipamentos no chão de fábrica, tornou-se fundamental a implementação de uma solução flexível. Esta solução requeria a medição de parâmetros como potência ativa, energia e fator de potência dos circuitos selecionados, integrando as informações obtidas no *Building Management System* (BMS) previamente instalado. Para tal, o analisador de energia que apresentava a melhor solução para a aplicação dada, do ponto de vista de custo, funcionalidade, instalação e suporte, foi o Episensor ZEM-61. Este equipamento permitia a transmissão sem fios dos parâmetros recolhidos através da tecnologia Zigbee, garantindo a sua comunicação com uma *gateway* SiCA. Por sua vez, a *gateway* encontrava-se conectada por Ethernet a um servidor SiCA, possibilitando a integração direta com o BMS existente. A escolha pela comunicação sem fios foi motivada pela flexibilidade exigida, possibilitando a adaptação às alterações do *layout* da fábrica sem comprometer a fiabilidade da monitorização do sistema. A Figura 2.3 ilustra o nível de transparência alcançado na visualização do consumo energético da instalação [25].

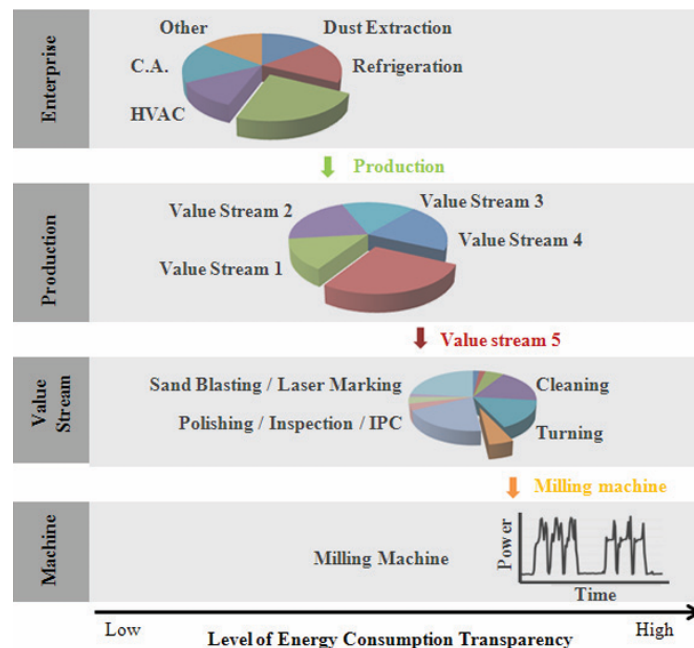


Figura 2.3: Estrutura de transparência na visualização do consumo energético [25].

A implementação do sistema de monitorização viabilizou a análise detalhada dos perfis de consumo e o desenvolvimento de indicadores de desempenho energético que, até então, não era possível devido à ausência de dados. Esta abordagem alinhou a unidade fabril às diretrizes da norma ISO 50001, promovendo avanços na gestão da energia. Adicionalmente, a instalação do sistema favoreceu a evolução dos princípios lean estabelecidos no caso de estudo, na medida que permitiu a avaliação dos processos produtivos em tempo real do ponto de vista do consumo energético. Deste modo, foi possível estabelecer estratégias de otimização operacional, tornando os processos mais eficientes e competitivos [25].

2.3 Caso 3 - Monitorização de Consumos Energéticos em Edifícios Hospitalares

De acordo com a referência [26], a monitorização do consumo energético em edifícios hospitalares desempenha um papel essencial na otimização da eficiência energética. Neste sentido, o estudo em questão aborda a implementação de um sistema de monitorização de energia no Hospital de San Martino, em Génova. O objetivo principal desta solução é a identificação de potenciais problemas na rede elétrica, bem como a avaliação de medidas que permitam reduzir o desperdício de energia. A infraestrutura elétrica do Hospital baseia-se numa rede de Média Tensão (MT) de 15 kV, que se estende por 3,7 km e apresenta 13 postos de transformação, os quais capacitam a instalação de uma potência de 4 MW. Além disso, o hospital apresenta

um sistema de trigeriação, que consiste na utilização de dois motores de combustão a gás natural para produzir energia elétrica e térmica, suprindo parcialmente os consumos energéticos da instalação [26].

A implementação do sistema de monitorização de energia foi realizada sem a necessidade de instalação de analisadores de energia dedicados. Em vez disso, a recolha de dados foi estabelecida através de uma *Remote Terminal Unit* (RTU), que comunicava remotamente com a instrumentação existente nas proteções de entrada e saída dos transformadores elétricos, utilizando o protocolo BACnet. Deste modo, os valores medidos eram transmitidos para um servidor central através do *File Transfer Protocol* (FTP), onde eram armazenados numa base de dados e processados pelo sistema, possibilitando o cálculo do consumo energético de cada posto de transformação. A arquitetura do sistema de monitorização de energia implementado no caso de estudo encontra-se ilustrada na Figura 2.4 [26].

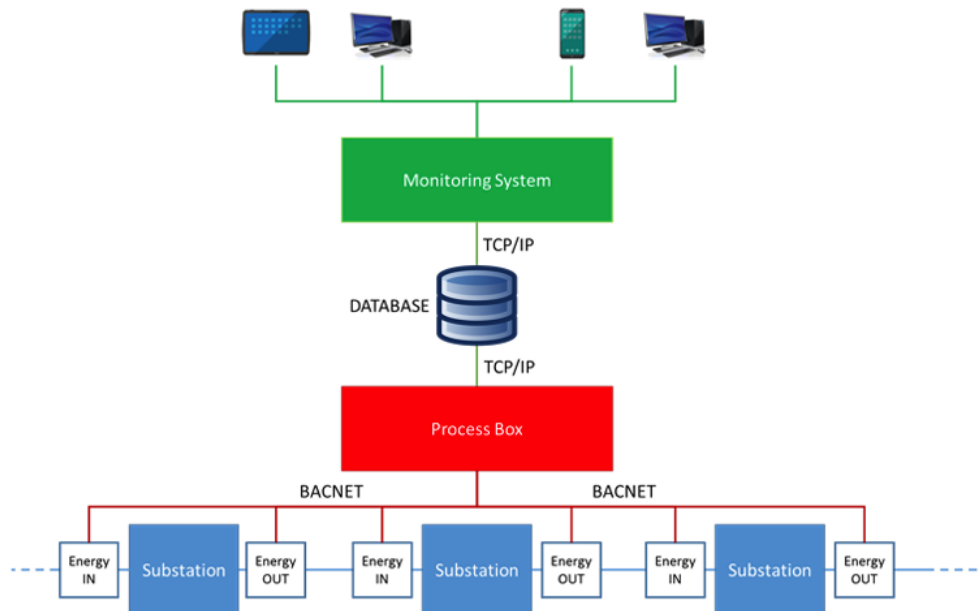


Figura 2.4: Arquitetura do sistema de monitorização de energia [26].

A monitorização e análise dos consumos eram efetuadas através da plataforma *Energy Smart Optimization System* (ESOS), um *software* acessível via *web service*. O ESOS permite o acesso simultâneo de vários utilizadores, em qualquer dispositivo, aos parâmetros energéticos em tempo real. A interface do sistema foi concebida para facilitar a experiência do utilizador no *software*, disponibilizando atalhos para elementos frequentemente analisados, como gráficos e tabelas. O protocolo BACnet desempenhou um papel fundamental na implementação do sistema de monitorização, uma vez que permitiu a integração entre as plataformas de monitorização e proteção dos postos de transformação, mesmo sendo provenientes de diferentes fabricantes.

Assim, garantiu-se a interoperabilidade entre os equipamentos, facultando a recolha e transmissão eficiente dos dados necessários para a monitorização do consumo energético [26].

Os primeiros meses de operação do sistema de monitorização demonstraram vários padrões de consumo que apontam para potenciais ineficiências energéticas. A análise comprovou que o consumo energético do hospital difere pouco ao longo do dia, fator característico das unidades de saúde que apresentam funcionamento contínuo. No entanto, verificaram-se discrepâncias no consumo de determinados pavilhões, como por exemplo o edifício de especialidades médicas, onde ocorrem picos de consumo noturnos e durante os fins de semana, que sugerem um uso ineficiente da energia. Adicionalmente, a Figura 2.5 apresenta a comparação do consumo energético semanal, em que o período de inverno surge representado em verde e o período de verão em vermelho [26].

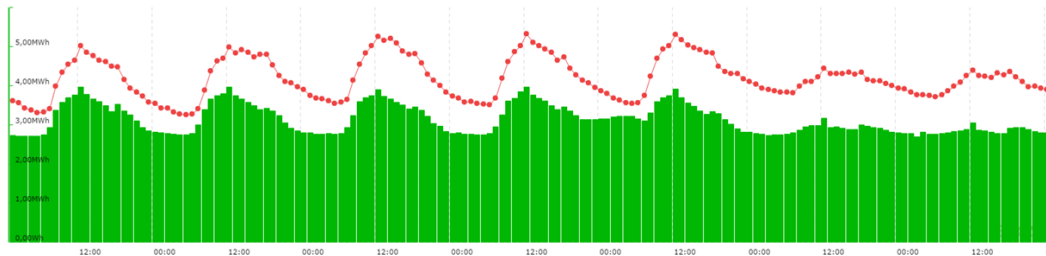


Figura 2.5: Comparação do consumo energético semanal nos períodos de inverno e verão [26].

Verifica-se um aumento do consumo energético durante o verão, atribuído, sobretudo, ao impacto da climatização e da refrigeração, que representam aproximadamente 25% do consumo total do hospital [26].

Os resultados iniciais obtidos com o sistema implementado evidenciam a importância da monitorização contínua, essencial para a deteção de anomalias e para a identificação de ações em prol da eficiência energética. Os próximos passos consistem na extensão da monitorização, através da instalação de dispositivos de medição em equipamentos e cargas críticas, com o objetivo de detalhar a análise do consumo energético total do hospital [26].

2.4 Caso 4 - Sistema de Monitorização de Energia com Aplicação no Departamento de Energia Elétrica da Universidade Gazi

O estudo referido em [27] apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema de monitorização de energia no Departamento de Energia Elétrica da Universidade de Gazi, na Turquia. Esta solução foi concebida com dupla finalidade:

por um lado, melhorar a eficiência energética do departamento e, por outro, servir como ferramenta pedagógica para os alunos. O departamento em que se realizou a implementação do sistema dispõe de uma potência elétrica instalada de 50 kW [27].

O sistema de monitorização de energia implementado no caso apresentado é composto por um analisador de energia Merlin Gerin PM850, um PLC e um módulo Ethernet. A utilização do PLC e de um *switch* permite a comunicação dos dados medidos pelo analisador de energia para um computador central, através do protocolo Modbus, onde são armazenados numa base de dados em intervalos de um minuto. O analisador de energia instalado apresenta a capacidade de medir diversos parâmetros elétricos, tais como a corrente, tensão, frequência, fator de potência, harmónicos, energia, potência ativa, reativa e aparente. A arquitetura do sistema de monitorização apresenta-se representada na Figura 2.6 [27].

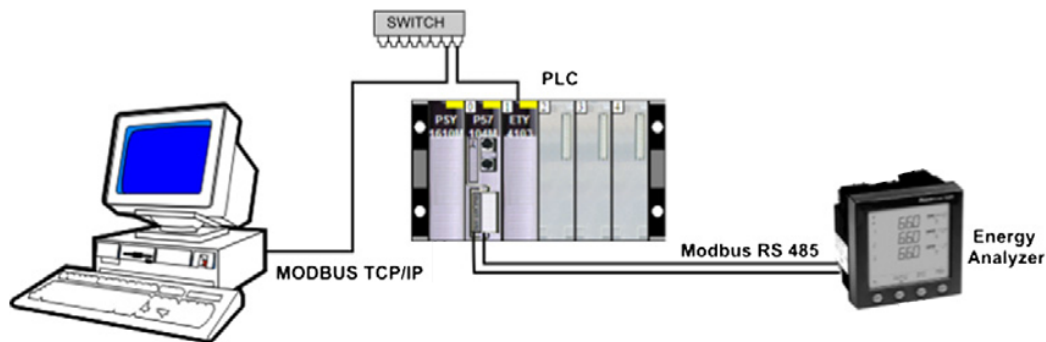
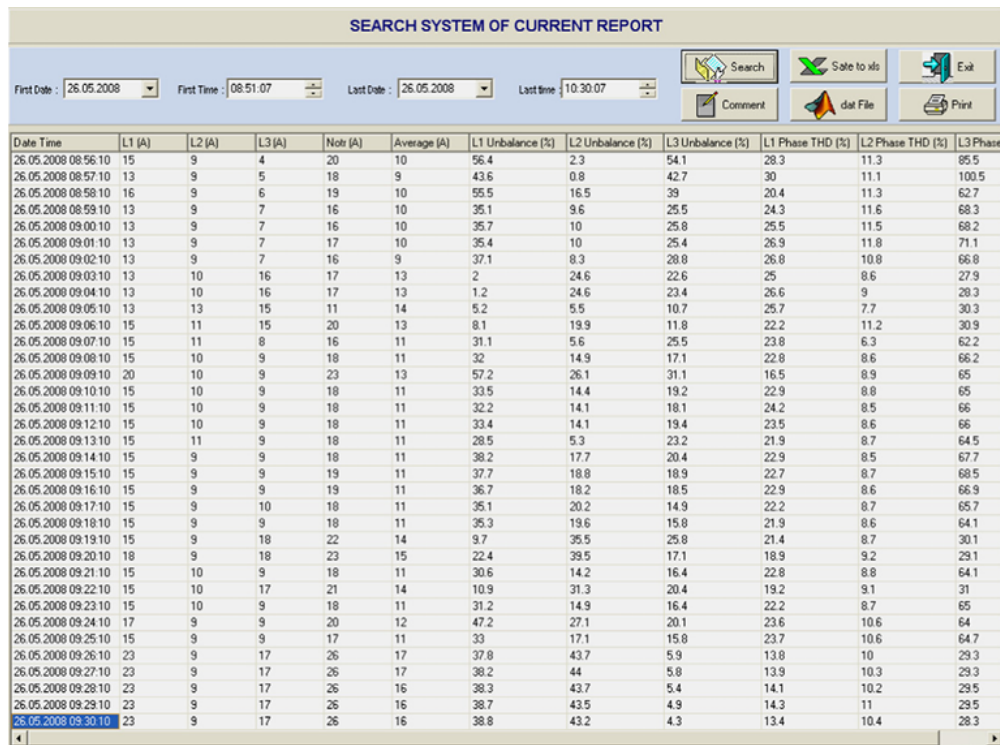


Figura 2.6: Arquitetura do sistema de monitorização de energia; adaptado de [27].

O *software* foi desenvolvido em Delphi 6 e permite a apresentação dos dados do sistema em tempo real. A interface é intuitiva, facultando a visualização dos parâmetros monitorizados tanto em formato numérico como gráfico. Além disto, o utilizador pode consultar históricos de consumo e gerar relatórios detalhados de uma variável específica para diferentes períodos de tempo, nomeadamente horário, diário, mensal e anual. A Figura 2.7 ilustra um relatório dos valores da corrente do sistema no período definido pelo utilizador [27].

2.5. Caso 5 - Sistema de Monitorização com Tecnologia de Comunicação Sem Fios



The screenshot displays a software interface titled "SEARCH SYSTEM OF CURRENT REPORT". At the top, there are search filters for "First Date" (26.05.2008), "First Time" (08:51:07), "Last Date" (26.05.2008), and "Last Time" (10:30:07). To the right of these filters are buttons for "Search", "Save to xls", "Exit", "Comment", "dat File", and "Print". Below the filters is a table with 13 columns: "Date Time", "L1 (A)", "L2 (A)", "L3 (A)", "Noiz (A)", "Average (A)", "L1 Unbalance (%)", "L2 Unbalance (%)", "L3 Unbalance (%)", "L1 Phase THD (%)", "L2 Phase THD (%)", and "L3 Phase". The table contains 48 rows of data, with the last row (26.05.2008 09:30:10) highlighted in blue.

Date Time	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)	Noiz (A)	Average (A)	L1 Unbalance (%)	L2 Unbalance (%)	L3 Unbalance (%)	L1 Phase THD (%)	L2 Phase THD (%)	L3 Phase
26.05.2008 08:56:10	15	9	4	20	10	56.4	2.3	54.1	28.3	11.3	85.5
26.05.2008 08:57:10	13	9	5	18	9	43.6	0.8	42.7	30	11.1	100.5
26.05.2008 08:58:10	16	9	6	19	10	55.5	16.5	39	20.4	11.3	62.7
26.05.2008 08:59:10	13	9	7	16	10	35.1	9.6	25.5	24.3	11.6	68.3
26.05.2008 09:00:10	13	9	7	16	10	35.7	10	25.8	25.5	11.5	68.2
26.05.2008 09:01:10	13	9	7	17	10	35.4	10	25.4	26.9	11.8	71.1
26.05.2008 09:02:10	13	9	7	16	9	37.1	8.3	28.8	26.8	10.8	66.8
26.05.2008 09:03:10	13	10	16	17	13	2	24.6	22.6	25	8.6	27.9
26.05.2008 09:04:10	13	10	16	17	13	1.2	24.6	23.4	26.6	9	28.3
26.05.2008 09:05:10	13	13	15	11	14	5.2	5.5	10.7	25.7	7.7	30.3
26.05.2008 09:06:10	15	11	15	20	13	8.1	19.9	11.8	22.2	11.2	30.9
26.05.2008 09:07:10	15	11	8	16	11	31.1	5.6	25.5	23.8	6.3	62.2
26.05.2008 09:08:10	15	10	9	18	11	32	14.9	17.1	22.8	8.6	66.2
26.05.2008 09:09:10	20	10	9	23	13	57.2	26.1	31.1	16.5	8.9	65
26.05.2008 09:10:10	15	10	9	18	11	33.5	14.4	19.2	22.9	8.8	65
26.05.2008 09:11:10	15	10	9	18	11	32.2	14.1	18.1	24.2	8.5	66
26.05.2008 09:12:10	15	10	9	18	11	33.4	14.1	19.4	23.5	8.6	66
26.05.2008 09:13:10	15	11	9	18	11	28.5	5.3	23.2	21.9	8.7	64.5
26.05.2008 09:14:10	15	9	9	18	11	38.2	17.7	20.4	22.9	8.5	67.7
26.05.2008 09:15:10	15	9	9	19	11	37.7	18.8	18.9	22.7	8.7	68.5
26.05.2008 09:16:10	15	9	9	19	11	36.7	18.2	18.5	22.9	8.6	66.9
26.05.2008 09:17:10	15	9	10	18	11	35.1	20.2	14.9	22.2	8.7	65.7
26.05.2008 09:18:10	15	9	9	18	11	35.3	19.6	15.8	21.9	8.6	64.1
26.05.2008 09:19:10	15	9	18	22	14	9.7	35.5	25.8	21.4	8.7	30.1
26.05.2008 09:20:10	18	9	18	23	15	22.4	39.5	17.1	18.9	9.2	29.1
26.05.2008 09:21:10	15	10	9	18	11	30.6	14.2	16.4	22.8	8.8	64.1
26.05.2008 09:22:10	15	10	17	21	14	10.9	31.3	20.4	19.2	9.1	31
26.05.2008 09:23:10	15	10	9	18	11	31.2	14.9	16.4	22.2	8.7	65
26.05.2008 09:24:10	17	9	9	20	12	47.2	27.1	20.1	23.6	10.6	64
26.05.2008 09:25:10	15	9	9	17	11	33	17.1	15.8	23.7	10.6	64.7
26.05.2008 09:26:10	23	9	17	26	17	37.8	43.7	5.9	13.8	10	29.3
26.05.2008 09:27:10	23	9	17	26	17	38.2	44	5.8	13.9	10.3	29.3
26.05.2008 09:28:10	23	9	17	26	16	38.3	43.7	5.4	14.1	10.2	29.5
26.05.2008 09:29:10	23	9	17	26	16	38.7	43.5	4.9	14.3	11	29.5
26.05.2008 09:30:10	23	9	17	26	16	38.8	43.2	4.3	13.4	10.4	28.3

Figura 2.7: Relatório dos valores da corrente [27].

O sistema implementado destacou-se como uma solução de baixo custo e elevada eficácia na análise do consumo de energia. Adicionalmente, foi testado numa planta industrial de pequena escala, obtendo resultados positivos. Assim, com as devidas alterações, é possível utilizar o sistema apresentado em aplicações de maior dimensão, permitindo o controlo e a otimização do consumo energético de forma eficiente e automatizada [27].

2.5 Caso 5 - Sistema de Monitorização com Tecnologia de Comunicação Sem Fios

O estudo apresentado em [28] aborda a implementação de um sistema de monitorização no laboratório de máquinas elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Jaén. Este local foi utilizado para avaliar a viabilidade da comunicação definida num ambiente industrial simulado, analisando a eficácia da transmissão de dados entre diferentes pisos e em condições de interferência eletromagnética [28].

A crescente necessidade de uma comunicação eficiente e sem restrições físicas promove o desenvolvimento de soluções sem fios para a monitorização e controlo de equipamentos industriais. Neste contexto, as redes *Low-Power Wide Area Network* (LPWAN) surgem como uma alternativa viável às limitações inerentes às conexões

com fios. Em particular, o protocolo *LOng RA*ng (LoRa) destaca-se pelo baixo consumo energético e longo alcance, que pode atingir até 10 km, tornando-se uma solução interessante para ambientes industriais. Assim, foi desenvolvido um sistema de monitorização baseado na tecnologia LoRa LPWAN, em que o equipamento primordial é designado *Power Analyzer Monitor and Programming Device* (PAMPD). Este dispositivo permite o controlo total das funções de leitura e a configuração dos parâmetros do analisador de energia, além de viabilizar a sua integração na rede de comunicação sem fios. O PAMPD é constituído pelos seguintes elementos principais:

- Microcontrolador - responsável pelo processamento das leituras e comandos;
- Chip de comunicação LoRa - assegura a transmissão eficiente e segura dos dados;
- Interface de comunicação RS-485 - garante a compatibilidade com analisadores de energia [28].

A principal vantagem da solução proposta reside na eliminação da necessidade de cablagem adicional para a comunicação entre equipamentos, assim como na possibilidade de armazenamento e análise dos dados na *cloud* em tempo real. O sistema pode ser segmentado em duas redes distintas, conforme representado na arquitetura da Figura 2.8, sendo estas descritas sucintamente abaixo:

- LoRa LPWAN - responsável pela comunicação sem fios entre os equipamentos de medição (PAMPD) e a *gateway* (PG1301), utilizando o protocolo LoRa, que permite um fluxo de dados bidirecional. O modelo PG1301 confere ao sistema a capacidade de integrar até 1 000 dispositivos LoRa, possibilitando a interoperabilidade com equipamentos de diferentes fabricantes e modelos;
- WAN/Wi-Fi - estabelece a ligação entre a *gateway* e o servidor *Internet Of Things* (IoT), facultando a conexão através de uma infraestrutura de rede com ou sem fios. No sistema desenvolvido, a plataforma *The Things Network* (TTN) desempenha a função de servidor IoT, permitindo a integração com diversos serviços e aplicações, tais como Google Sheets, Google Firebase, *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT), entre outros [28].

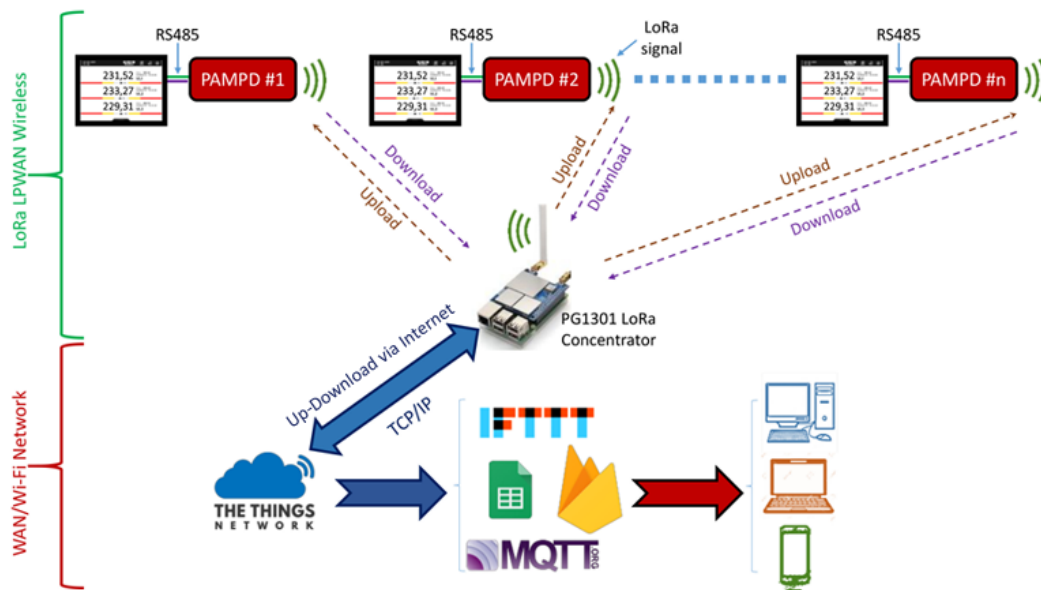


Figura 2.8: Arquitetura do sistema proposto; adaptado de [28].

Posto isto, os dados ficam disponíveis em qualquer equipamento, onde é possível monitorizar e armazenar os mesmos, bem como enviar comandos programados para os analisadores de energia [28].

De modo a validar o desempenho do sistema de monitorização desenvolvido, foram conduzidos testes experimentais com uma duração de 30 minutos no laboratório de máquinas elétricas da Universidade de Jaén. O foco da avaliação incidiu na confiabilidade da transmissão dos dados, perante condições típicas de ambientes industriais. Para tal, posicionou-se a *gateway* PG1301 distanciada dos equipamentos de medição, estabelecendo uma distância considerável. Deste modo, os testes demonstraram que a comunicação estabelecida manteve uma taxa de perda de dados inferior a 3%, mesmo em condições de interferência eletromagnética moderada [28].

Tal como mencionado anteriormente, é possível integrar os dados do sistema em diferentes serviços e aplicações através do servidor TTN. No caso específico da sua incorporação no Google Sheets, o processo inicia-se com a criação de uma conta na plataforma TTN e o registo da *gateway* utilizada. Posteriormente, é necessário configurar a aplicação correspondente para a gestão dos dispositivos. Para permitir a transmissão automática de dados para o Google Sheets, procede-se à adição dos equipamentos na aplicação e à configuração de uma integração *HyperText Transfer Protocol* (HTTP). Nesta etapa, define-se o endereço do documento onde os dados serão armazenados. No Google Sheets, cria-se uma folha de cálculo e estabelece-se um mecanismo para a receção das informações via HTTP. Com este procedimento, os dados obtidos pelo sistema são automaticamente registados no serviço, possibilitando a sua monitorização em tempo real, conforme ilustrado na Figura 2.9 [28].

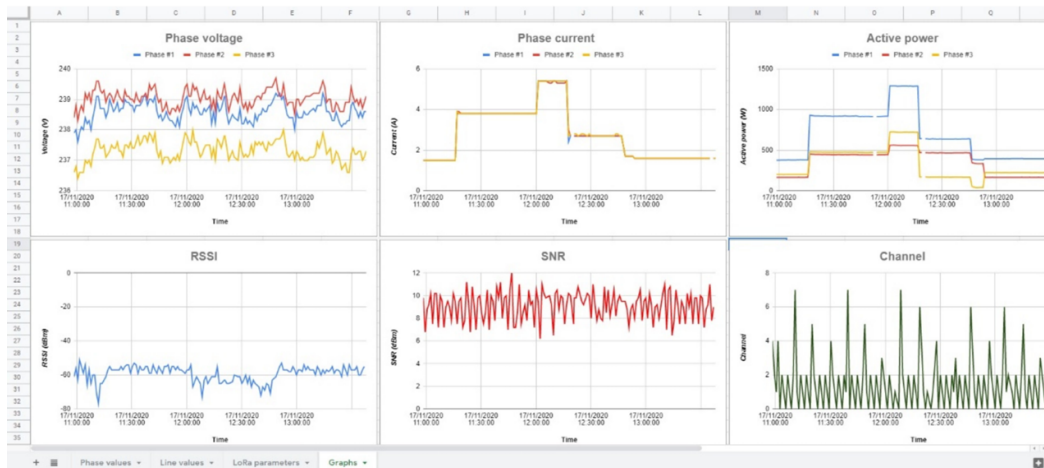


Figura 2.9: Dados disponíveis no Google Sheets; adaptado de [28].

A implementação desta solução demonstrou a viabilidade de integrar analisadores de energia em redes sem fio de forma económica, utilizando o protocolo LoRa e a interface RS-485. O PAMPD destaca-se pelo seu baixo custo, dimensões compactas, elevada eficiência de transmissão e reduzida perda de informação. Adicionalmente, a conectividade proporcionada pela rede LoRa LPWAN permite a monitorização e configuração remota dos equipamentos, otimizando a gestão das instalações elétricas em diferentes escalas industriais [28].

2.6 Análise Comparativa dos Casos de Estudo

Após a apresentação de cada caso de estudo, seria pertinente realizar uma análise comparativa dos diferentes casos. Esta poderia basear-se em alguns indicadores de *performance* frequentemente relevantes em projetos de monitorização, tais como escalabilidade, robustez, custo e interoperabilidade. No entanto, os documentos referentes aos casos apresentados não fornecem, de forma explícita, dados ou *feedback* sobre a *performance* dos sistemas implementados relativamente aos indicadores mencionados. Assim, torna-se inviável disponibilizar uma análise comparativa detalhada para cada caso.

Capítulo 3

Conceitos Fundamentais

Ao longo deste capítulo serão apresentados os conceitos que sustentam o desenvolvimento do presente projeto, abrangendo tecnologias, equipamentos e princípios teóricos relevantes. Esta fundamentação visa proporcionar uma compreensão clara dos elementos essenciais, facilitando a integração e aplicação das soluções selecionadas ao longo do trabalho. Assim, este capítulo constitui a base para a correta execução das fases subsequentes do projeto.

3.1 Gestão e Monitorização de Energia

O Sistema de Gestão de Energia (SGE) engloba um conjunto de ferramentas destinadas à monitorização, otimização e controlo eficaz da produção, distribuição e consumo de energia. O seu principal objetivo é o aumento da eficiência energética através da monitorização contínua das instalações, da melhoria do desempenho dos equipamentos e da redução do consumo energético, sem comprometer as necessidades do cliente [6].

Embora a redução dos custos com energia contribua diretamente para o aumento da rentabilidade das organizações, a identificação e implementação de medidas de eficiência energética exige, muitas vezes, investimentos significativos. Este fator constitui um dos principais entraves à adoção do SGE [6].

A gestão e monitorização de energia envolvem, assim, a instalação e o desenvolvimento de *hardware* e *software* específicos, capazes de medir, registar e analisar com

precisão o desempenho dos vários equipamentos e os consumos energéticos associados. A correta integração destes elementos permite às organizações tomar decisões fundamentadas e sustentadas relativamente à sua estratégia energética [7].

Tipicamente, um SGE é estruturado em três níveis hierárquicos, conforme representado na Figura 3.1:

1. Inferior (*Bottom*) - compreende os dispositivos de aquisição de dados, como por exemplo sensores e analisadores de energia, que monitorizam parâmetros dos processos e os consumos energéticos em tempo real;
2. Intermédio (*Middle*) - diz respeito à camada de comunicação, responsável por garantir a transmissão dos dados adquiridos para os dispositivos centrais de gestão, como computadores ou servidores;
3. Superior (*Top*) - corresponde à interface homem-máquina, isto é, à plataforma de *software* que permite visualizar e analisar os dados, facilitando a tomada de decisões e o controlo do sistema de monitorização e gestão energética [29].

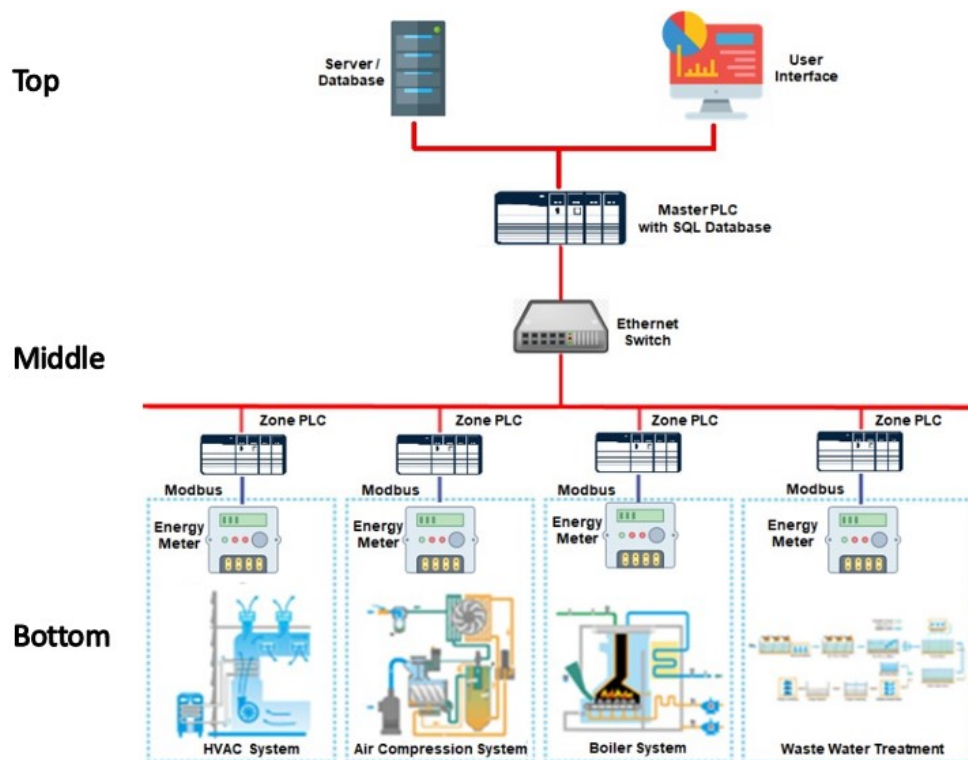


Figura 3.1: Arquitetura de um SGE; adaptado de [30].

3.2 Norma ISO 50001

A norma ISO 50001 surgiu em 2011 e suporta a implementação de um SGE. Esta não foi a primeira norma de gestão de energia, visto que já tinham sido definidas várias normas nacionais e regionais, como por exemplo a *European Norm* (EN) 16001. Deste modo, a ISO 50001 veio melhorar e universalizar as normas já existentes para a implementação de um SGE. A sua implementação pode variar consoante o tipo de operações a gerir, os recursos energéticos que são utilizados e da instalação prévia de um SGE [31], [32].

A ISO 50001 descreve os requisitos para estabelecer, implementar, manter e melhorar um SGE, com o propósito de permitir à organização seguir uma abordagem para alcançar a melhoria do desempenho energético, incluindo a eficiência energética, segurança, consumo de energia e redução de custos. Esta norma não impõe nenhum objetivo específico para melhorar o desempenho energético. Por sua vez, os objetivos energéticos estratégicos e operacionais são da responsabilidade da própria organização, ou seja, qualquer organização, independentemente do seu nível atual de gestão de energia, pode implementar o padrão ISO 50001 para estabelecer uma linha de base e, ao longo do tempo, melhorar o seu aproveitamento. As empresas contratam organismos de certificação para realizar auditorias regulares independentes, de modo a serem certificadas para usar um SGE em conformidade com a ISO 50001. Por um lado, estas certificações, geralmente, não são exigidas por lei, no entanto, servem como comprovativo que a organização está a fazer esforços em prol do desempenho energético [31], [32], [33].

À semelhança dos padrões de gestão ISO, como por exemplo o de gestão de qualidade (i.e. ISO 9001) e o do ambiente (i.e. ISO 14001), a norma ISO 50001 pode ser implementada por qualquer organização, independentemente do seu tamanho, ramo de negócio ou localização. As normas de gestão ISO baseiam-se no método *Plan-Do-Check-Act* (PDCA), sendo este explicado de seguida [31].

3.2.1 Método Plan-Do-Check-Act

A implementação e execução de um SGE com o padrão ISO 50001 segue o método PDCA, também utilizado nos padrões ISO 9001 e 14001. O PDCA fornece uma estrutura que visa a procura da melhoria contínua dos processos e dos produtos. Esta estrutura permite uma reavaliação contínua do consumo de energia e uma otimização e redução sustentável. É um modelo dinâmico e repetitivo, na medida que os resultados de um ciclo são a entrada para o seguinte. Este método descreve quatro fases, sendo as mesmas descritas da seguinte forma:

- *Plan* - efetua uma análise energética e define a linha de base, indicadores de desempenho energético, objetivos, metas e planos de ação necessários para

alcançar resultados em conformidade com as oportunidades de melhoria do desempenho energético e da própria política energética da entidade que pretende implementar o SGE;

- *Do* - empreende os planos de ação para executar a gestão de energia, como por exemplo, fornecer indicações ou formação aos elementos responsáveis pela monitorização de energia;
- *Check* - monitoriza e afere os processos e os produtos envolvidos, as características principais das operações que determinam o desempenho energético em prol da política e dos objetivos energéticos, assim como concede o *feedback* dos resultados obtidos;
- *Act* - realiza um conjunto de operações que visem promover a melhoria contínua do desempenho energético e do SGE [31], [32], [34].

3.3 Sistema SCADA

O SCADA é um sistema amplamente utilizado para a supervisão, monitorização e controlo de processos industriais em tempo real. Este combina *hardware* e *software*, permitindo a aquisição, processamento e análise de grandes volumes de dados provenientes de equipamentos e sensores. Encontra-se presente em diversos setores industriais, tais como o energético, transporte, petróleo, água, gás, entre outros. Os dados adquiridos são imprescindíveis para a monitorização contínua dos processos, facultando a deteção de falhas, a otimização do desempenho operacional e uma tomada de decisões célere e informada. Além disto, o SCADA possibilita a automatização dos diferentes processos, contribuindo para o aumento da eficiência das infraestruturas e para a redução dos custos operacionais [35], [36].

3.3.1 Componentes do sistema SCADA

Na Figura 3.2 estão apresentados os quatro conceitos principais que integram os componentes de um sistema SCADA, pelo que se encontram sucintamente descritos abaixo:

- Aquisição de dados - responsável pela obtenção em tempo real dos dados dos equipamentos de campo, processo executado através da RTU e/ou PLC;
- Transferência de dados - realiza a troca de informações entre os diversos equipamentos de um sistema de SCADA, utilizando protocolos de comunicação e meios com ou sem fios, garantindo a integração e sincronização dos equipamentos distribuídos;

- Armazenamento de dados - efetua o registo dos dados numa base de dados, mantendo um histórico completo das operações, essencial para análises posteriores, identificação de tendências, resolução de problemas e otimização do desempenho do sistema;
- Supervisão e controlo de dados - permite ao operador monitorizar em tempo real os dados do sistema através da *Human Machine Interface* (HMI). O controlo central é efetuado pela *Master Terminal Unit* (MTU), que estabelece a ligação entre o *software* de visualização e os equipamentos de aquisição de dados [37], [38].

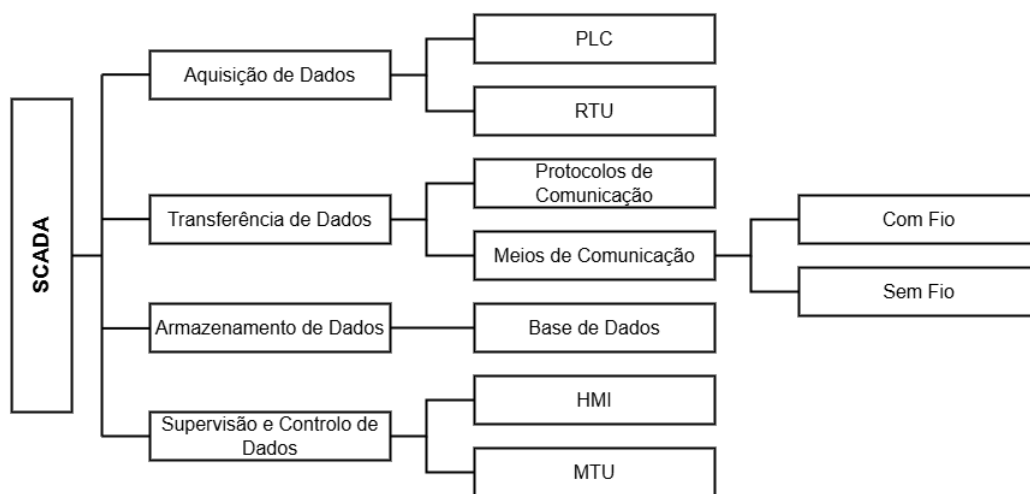


Figura 3.2: Componentes de um sistema SCADA; adaptado de [38].

3.3.2 Evolução da arquitetura dos sistemas SCADA

Com o avanço da tecnologia ao longo do tempo, os sistemas SCADA sofreram diversas alterações na sua arquitetura e nos paradigmas de comunicação, de modo a facultar novas funcionalidades e recursos que permitem tornar os processos mais seguros e eficientes. Assim, a arquitetura destes sistemas pode ser classificada cronologicamente através de quatro gerações, as quais se encontram descritas de seguida:

1. Monolítica - a primeira geração baseou-se em *mainframes* isolados com elevada capacidade de computação. A comunicação entre as RTU e o *mainframe* era realizada através do conceito de *Wide Area Network* (WAN). Os protocolos de comunicação utilizados eram proprietários, limitando a troca de informações exclusivamente entre as RTU e o *mainframe* do mesmo fornecedor. Esta dependência restringia a interoperabilidade e, conseqüentemente, comprometia a escalabilidade do sistema, dificultando a expansão ou integração com novas tecnologias;

2. Distribuída - esta arquitetura é marcada pela implementação de LAN, que facultam a troca de dados em tempo real entre diferentes sistemas. Além disto, este modelo permitiu a introdução de redundância, o que contribui para a melhoria da confiabilidade do sistema. Embora ainda persista a utilização de protocolos proprietários, esta geração demonstrou uma eficiência aprimorada, oferecendo maior rapidez e redução de custos comparativamente à versão anterior;
3. Rede - baseada na evolução da arquitetura anterior, esta geração caracteriza-se pela adoção de tecnologias comerciais que possibilitam a conexão através de redes *Internet Protocol* (IP), em detrimento dos protocolos proprietários. Isto, possibilitou maior flexibilidade e padronização dos sistemas, facilitando a sua integração e operação. Esta arquitetura destaca-se pela utilização de protocolos baseados em IP sobre WAN, permitindo a integração de redes além das limitações impostas por LAN, viabilizando, assim, a expansão geográfica dos sistemas SCADA. Adicionalmente, a utilização de padrões abertos melhora a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes, aumentando a escalabilidade e a *performance* do sistema;
4. *Internet of Things* - as soluções mais recentes baseiam-se na integração do SCADA com o conceito de IoT e ambientes em *cloud*, proporcionando ao sistema maior flexibilidade, escalabilidade e capacidade de processamento de grandes volumes de dados. Contudo, esta evolução tecnológica levanta preocupações relativamente à segurança, uma vez que a maior exposição à internet torna os sistemas mais vulneráveis a ciberataques, exigindo medidas robustas de proteção para garantir a integridade e confiabilidade das operações [38], [39].

3.4 Modbus

O Modbus é uma tecnologia de comunicação introduzida pela empresa Modicon, atual Schneider Electric, largamente utilizada na indústria devido à sua simplicidade e confiabilidade. Efetivamente, é um padrão de comunicação industrial que permite a transmissão, em tempo real, de grandes quantidades de dados usados em controladores e em dispositivos de medida. O protocolo alberga dois modos de transmissão em série, *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) e RTU e o Modbus *Transmission Control Protocol* (TCP), representados na Figura 3.3 [40], [41].

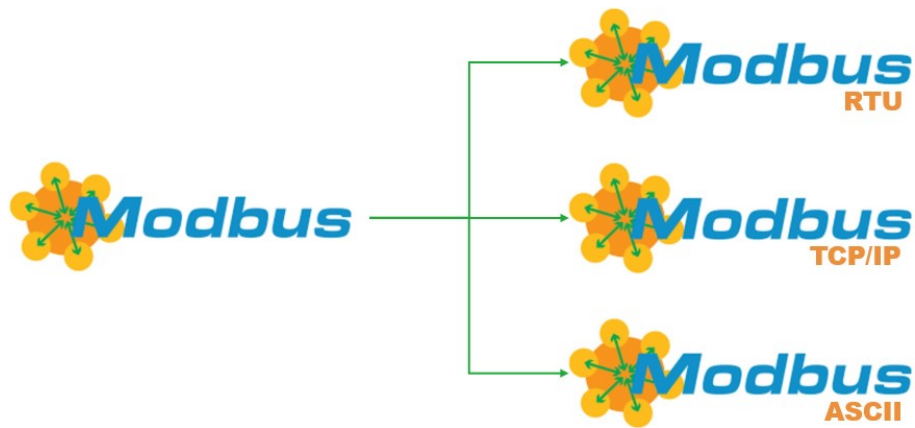


Figura 3.3: Redes de comunicação Modbus; adaptado de [42], [43].

Os primeiros suportam RS-232, RS-422 e RS-485, enquanto o último emprega o meio físico Ethernet [40], [41].

A velocidade de transmissão dos dados varia de acordo com o padrão que esteja a ser utilizado, assim como o comprimento e o número máximo de dispositivos conectados à rede. Na comunicação série, é importante que a taxa de transferência de dados seja a mesma em todo o sistema. Deste modo, os dispositivos devem estar configurados de igual forma quanto ao modo de transmissão e parâmetros, como por exemplo o *baud rate*, a paridade, *stop bits*, entre outros [42], [44].

No modelo *Open Systems Interconnection* (OSI), o Modbus insere-se na camada sete, a de aplicação. Este protocolo apresenta uma arquitetura de comunicação *master/slave*, ou *client/server* no caso do Modbus TCP, entre os dispositivos que se encontram conectados na rede. Cada dispositivo *slave* deve apresentar explicitamente um endereço único atribuído, enquanto o *master* está endereçado implicitamente. O barramento é constituído apenas por um *master* e várias *slaves*, até um máximo de 247, número que depende, na prática, do meio utilizado para a comunicação, sendo o *master* o único responsável por iniciar a transmissão. Este pode comunicar com as *slaves* através de dois modos, ilustrados na Figura 3.4: *unicast* ou *broadcast* [40], [45], [46], [47].

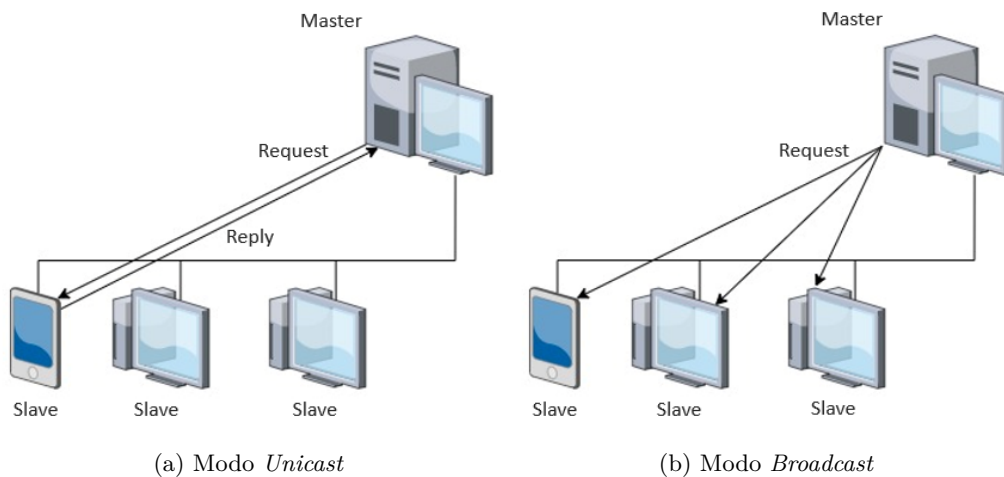


Figura 3.4: Modos de comunicação Modbus; adaptado de [48].

Por um lado, o modo *unicast*, apresentado na Figura 3.4a, prende-se na comunicação individual entre o *master* e as *slaves*, isto é, o *master* envia um pedido (i.e. *request*) para o endereço de uma única *slave* e esta, por sua vez, processa e envia uma mensagem de resposta (i.e. *reply*) para o *master*. Por outro lado, o modo *broadcast*, exibido na Figura 3.4b, baseia-se no envio de um pedido por parte do *master* para todas as *slaves* simultaneamente e estas, contrariamente ao modo anterior, não geram qualquer tipo de resposta [40], [45], [46], [47].

O Modbus define uma estrutura para o envio das mensagens que beneficia da predefinição de tramas, incluindo a indicação do início e do fim da transmissão nos modos RTU e ASCII. Isto, permite que a mensagem seja passível de ser identificada e utilizada pelos dispositivos que se encontram na rede, independentemente do tipo de rede onde está a ser realizada a comunicação. No entanto, o Modbus TCP não apresenta essas tramas, uma vez que a sua mensagem já apresenta a indicação do comprimento dos dados que irá enviar e, deste modo, o dispositivo que recebe a mensagem já identifica o início e o fim da mesma. Adicionalmente, a estrutura do Modbus, representada na Figura 3.5, é caracterizada por apresentar uma *Application Data Unit* (ADU) gerada pelo *master* no seu miolo, que apresenta um conjunto de campos que dependem do tipo de rede onde está a ser efetuada a comunicação [42], [46], [49].

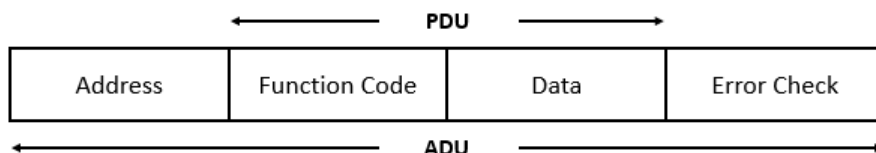


Figura 3.5: Estrutura geral de uma mensagem Modbus; adaptado de [47].

Portanto, de modo geral, a ADU apresenta o endereço do dispositivo, uma *Protocol Data Unit* (PDU) que engloba o código de função e os dados e, uma verificação de erros da mensagem [42], [46], [49].

Através do campo do endereço, o *master* pode definir o endereço ao qual pretende solicitar um pedido e, por sua vez, os dispositivos (i.e. *slaves*) que se encontram na rede descodificam esse endereço, de modo a identificar qual deve receber a mensagem, podendo tomar 256 valores possíveis:

- Endereço 0 - o pedido é enviado a todas as *slaves* em modo *broadcast*, não existindo qualquer mensagem de resposta por parte destas;
- Endereços 1 a 247 - o pedido é dirigido exclusivamente à *slave* correspondente, em modo *unicast*, a qual processa a solicitação e, posteriormente, envia uma mensagem de resposta ao *master*;
- Endereços 248 a 255 - correspondem a endereços reservados, como por exemplo para *gateways* [44].

O código de função define a ação que deve ser executada pela *slave*, que pode ser de leitura ou escrita analógica/digital, apresentando-se as mais comuns na Tabela 3.1 [50].

Tabela 3.1: Códigos de função mais comuns; adaptado de [44].

Function Code	Action
01	Read discrete output coils
02	Read discrete input contacts
03	Read analog output holding registers
04	Read analog input registers
05	Write single discrete output coils
06	Write single analog output holding registers
15	Write multiple discrete output coils
16	Write multiple analog output holding registers

Por sua vez, o campo dos dados consiste na informação adicional que um dispositivo deve utilizar para realizar a função que lhe é atribuída no campo do código de função. O campo de verificação de erros da mensagem é utilizado somente na comunicação série e apoia-se num método que permite aos dispositivos validarem a integridade do conteúdo da mensagem. No Modbus RTU e ASCII, a verificação dos erros pode ser feita por *Cyclic Redundancy Check* (CRC) e *Longitudinal Redundancy Check* (LRC), respetivamente. Este campo é inicialmente verificado pelo

master e, de seguida, é enviado para a *slave* onde vai ser recalculado pela mesma, validando o que foi enviado pelo *master*. Neste contexto, caso seja detetado algum erro, nenhuma resposta é devolvida por parte da *slave* solicitada [50], [51], [52].

De seguida, vão ser abordadas as diferentes redes de Modbus apresentadas anteriormente na Figura 3.3.

3.4.1 Modbus RTU

O Modbus RTU caracteriza-se pela comunicação série e é uma das redes do Modbus mais utilizadas na indústria. Como mencionado anteriormente, apresenta um modelo de comunicação *master/slave* entre os dispositivos da rede e suporta os meios físicos RS-232, RS-422 ou RS-485, sendo o RS-485 o mais comum devido às suas características. No Modbus RTU, cada mensagem de 8 *bits* (i.e. 1 *byte*) apresenta dois caracteres hexadecimais de 4 *bits* cada, designados *nibbles*. O início da transmissão de dados é decorrente de um intervalo de tempo correspondente, no mínimo, a 3,5 vezes o tempo de transmissão de um *byte* de dados. Após este período, qualquer caractere que seja enviado marca o início de uma nova mensagem no Modbus RTU, conforme ilustrado na Figura 3.6 [47], [52], [53], [54].

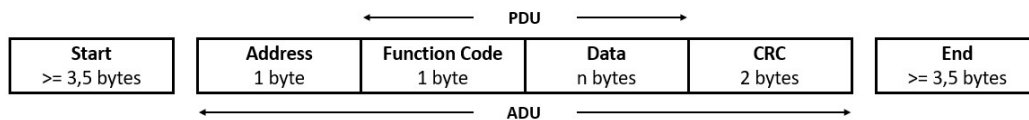


Figura 3.6: Estrutura da mensagem Modbus RTU; adaptado de [55].

Da mesma forma, o término da transmissão de dados também decorre do mesmo intervalo de tempo que carimba o início do envio de dados. Por sua vez, cada mensagem deve ser transmitida de forma contínua, isto é, o intervalo de tempo entre os caracteres não pode ser superior a 1,5 *bytes*. De outra forma, o dispositivo vai receber uma mensagem de erro e vai interpretar que esta transmissão de dados foi concluída e, portanto, vai esperar que seja estabelecida uma nova mensagem [47], [52], [53], [54].

Quando a transmissão da mensagem é instaurada, esta é composta pela ADU que contempla os campos do endereço do dispositivo, a PDU que contém os campos do código de função e o de dados e, por último, a verificação de erros por CRC. O campo do endereço e o código de função são enviados com o formato de 1 *byte*, a verificação de erros é feita através de 2 *bytes* e os dados dependem do conteúdo que é solicitado pelo *master* e devolvido pela *slave*. No caso de o intervalo de tempo para o início da transmissão ser inferior a 3,5 *bytes*, o dispositivo considera que se trata da mensagem precedente e, por conseguinte, o valor do campo CRC será inválido, dando origem a um erro [52], [53].

3.4.2 Modbus ASCII

À semelhança do Modbus RTU, o Modbus ASCII também se apresenta como um protocolo de comunicação série, com arquitetura *master/slave* e permite os meios físicos RS-232, RS-485 ou RS-422. Neste modo, cada *byte* da mensagem é enviado no formato de dois caracteres ASCII que representam o valor hexadecimal do *byte*. A estrutura da mensagem no Modbus ASCII, apresentada na Figura 3.7, inicia-se com o caractere dois pontos (i.e. :), que corresponde a 3A em hexadecimal [47], [56].

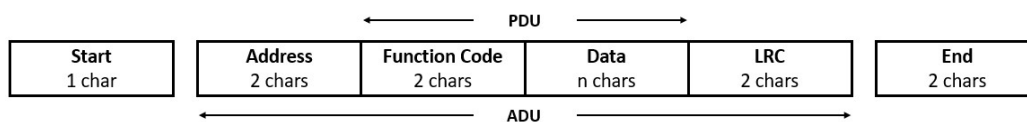


Figura 3.7: Estrutura da mensagem Modbus ASCII; adaptado de [55].

Por sua vez, o término da transmissão é assinalado pelo par de caracteres *Carriage Return - Line Feed* (CRLF), representados em hexadecimal por 0D e 0A, respetivamente [47], [56].

Dado o início da transmissão da mensagem, esta é caracterizada pela ADU que contém o campo do endereço do dispositivo, a PDU que contém os campos do código de função e de dados e, por último, a verificação de erros por LRC. Todos os campos mencionados, à exceção do campo de dados, apresentam-se como 2 chars (i.e. caracteres), enquanto os dados dependem do conteúdo que é enviado pelo dispositivo que é solicitado [57].

3.4.3 Modbus TCP

O Modbus TCP decorre da implementação do protocolo Modbus com a interface Ethernet TCP/IP, isto é, o TCP/IP e o meio físico Ethernet facultam a transmissão dos dados da mensagem Modbus entre dispositivos compatíveis, sendo os dados encapsulados e enviados em pacotes. O TCP apresenta a função de assegurar que todos os pacotes de dados são recebidos corretamente, ao passo que o IP certifica que o endereçamento e o encaminhamento das mensagens são realizados sem erros. Deste modo, o TCP/IP representa o protocolo de transporte dos dados e, portanto, não altera a estrutura padrão da mensagem Modbus. A distinção entre a estrutura padrão e a do Modbus TCP prende-se na forma como é representado o endereçamento e na remoção do campo de verificação de erros, como demonstrado na Figura 3.8 [42], [53].

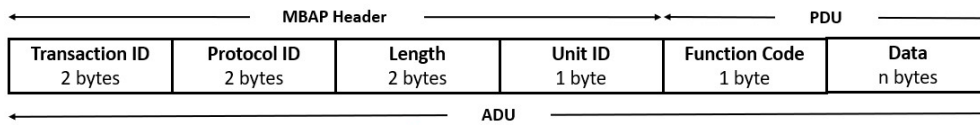


Figura 3.8: Estrutura da mensagem Modbus TCP; adaptado de [42], [53].

A mensagem deste protocolo inclui a ADU que contempla o cabeçalho *ModBus Application Protocol* (MBAP) e a PDU, esta última que se apresenta semelhante aos protocolos de comunicação série do Modbus. Por sua vez, o MBAP é o responsável pelo endereçamento e apresenta os seguintes campos:

- *Transaction Identifier* (2 bytes) - identifica a transação que é enviada (i.e. *request/response*), de modo a garantir que não haja conflito de informações, visto que são transmitidas múltiplas mensagens através da mesma conexão TCP por parte do cliente, sem esperar por uma resposta antecedente;
- *Protocol Identifier* (2 bytes) - caracteriza o protocolo usado na comunicação e, dado que corresponde ao Modbus, este valor é sempre 0;
- *Length* (2 bytes) - indica o comprimento dos campos que lhe seguem na estrutura da mensagem, nomeadamente os campos de identificação do dispositivo, o código de função e os dados;
- *Unit Identifier* (1 byte) - define o dispositivo ao qual pretende estabelecer comunicação, sendo possível a identificação de equipamentos num barramento série, como por exemplo Modbus RTU, através de uma *gateway* [49], [58], [59].

Este protocolo baseia-se na arquitetura *client/server*, que se assemelha à arquitetura *master/slave* da comunicação série do Modbus e, por analogia, o *client* corresponde ao *master* e o *server* à *slave*. Contrariamente ao Modbus por comunicação série, o Modbus TCP permite que um *server/slave* comunique com vários *clients/masters*, conforme ilustrado na Figura 3.9 [58], [60].

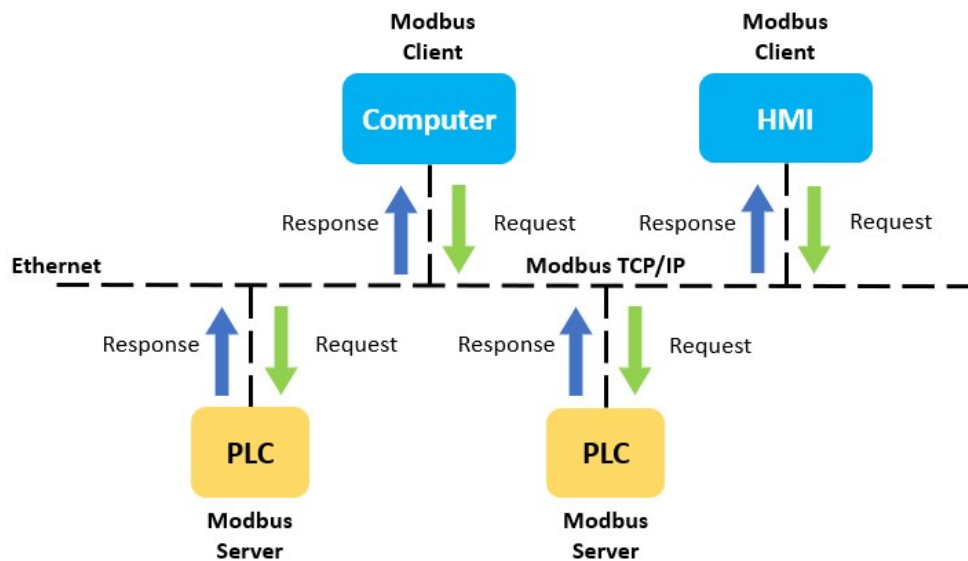


Figura 3.9: Topologia do Modbus TCP; adaptado de [61].

Os dispositivos incorporados no Modbus TCP efetuam o envio e a recepção dos dados através da porta 502, esta que é reservada para comunicações Modbus [58], [60].

O *client* envia uma mensagem (i.e. *request*) para o *server* e este, por sua vez, executa o que lhe foi pedido e envia uma mensagem de resposta (i.e. *response*) com os dados solicitados. Deste modo, são definidos três tipos de PDU no Modbus TCP: o de *request*, *response* e o *exception response*. Caso o formato e o conteúdo da mensagem do *client* estiver correto, o *server* vai enviar uma resposta, onde o campo do código de função é igual ao do *client* e o de dados apresenta o conteúdo requisitado. De outra forma, caso ocorram erros, é devolvida uma mensagem (i.e. *exception response*), em que o código de função provém da operação de *bitwise* aplicada ao código de função do *client*, sendo o valor do *bit* mais significativo alterado para 1, enquanto o campo de dados contém um código indicativo do erro [58], [62], [63].

3.5 RS-485

A comunicação série é o processo de envio e de recepção de um *byte* de dados, um *bit* de cada vez, contrariamente ao que se dá na comunicação paralela, onde são enviados e recebidos 8 *bits* de uma só vez. A taxa de transmissão de dados, conhecida como *baud rate*, é uma medida de velocidade de comunicação que indica o número de *bits* transmitidos por segundo [64].

O RS-485 é um padrão de transmissão de dados para comunicação série baseado no RS-232 e RS-422 e, é também conhecido como EIA-485 ou TIA-485. É amplamente utilizado no processo industrial, pois é ideal para transmissão de dados a

longas distâncias, velocidades elevadas e ambientes com muita interferência eletromagnética. Permite uma transmissão de dados de 10 *MegaBits Per Second* (Mbps) até uma distância de 15 m, porém, permite operar a distâncias até 1 200 m para velocidades inferiores, na ordem dos 100 *KiloBits Per Second* (kbps). Este padrão possibilita a comunicação de até 32 dispositivos ligados num só barramento, em que estes são capazes de transmitir e receber dados que advém do barramento. O barramento consiste na presença de um dispositivo *master* e de até 31 dispositivos *slaves*, como ilustrado na Figura 3.10 [65], [66], [67], [68].

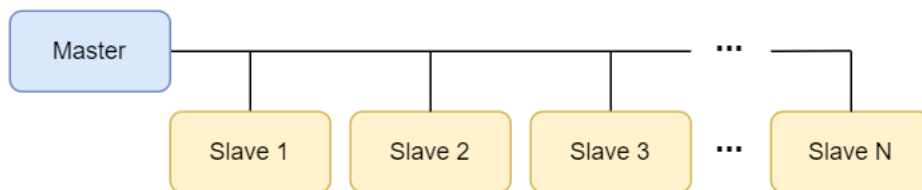


Figura 3.10: Barramento RS-485; adaptado de [68].

O número de dispositivos e a distância do barramento podem ser aumentados através de repetidores de sinal, sem prejudicar a fiabilidade dos dados. Quanto maior for a velocidade de comunicação pretendida no barramento, menor deverá ser o comprimento do barramento, como demonstrado na Figura 3.11 [67].

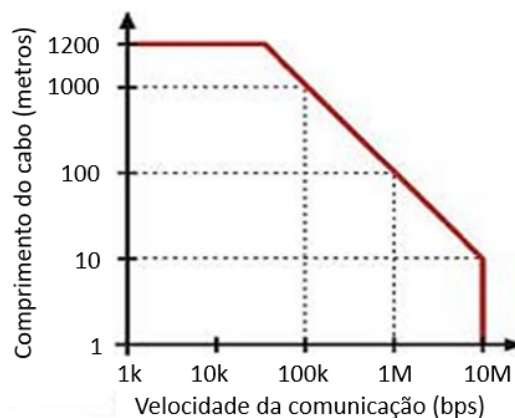


Figura 3.11: Relação da velocidade e o comprimento do cabo de comunicação RS-485; adaptado de [69].

Na comunicação série, os dados podem ser transferidos de dois modos, síncrono e assíncrono. No modo síncrono, a transferência de dados baseia-se num sinal de *clock* que permite a sincronização entre o transmissor e o recetor. Quando a ligação é estabelecida, dá-se o início da transferência de dados entre ambos e, mesmo quando não estão a ser transferidos dados, está a ser enviado um *fill character* de modo a assegurar a continuidade da transmissão. Isto, é a maneira mais adequada para a transmissão de dados no modo síncrono, visto que só são enviados *bits* de dados nesta transmissão. Contudo, pode ocorrer o envio de dados corrompidos, caso a

ligação entre o transmissor e o recetor não esteja sincronizada. Por sua vez, o modo assíncrono, representado na Figura 3.12, além da utilização de *bits* de dados, engloba também os *bits* de início, paridade e paragem [64].

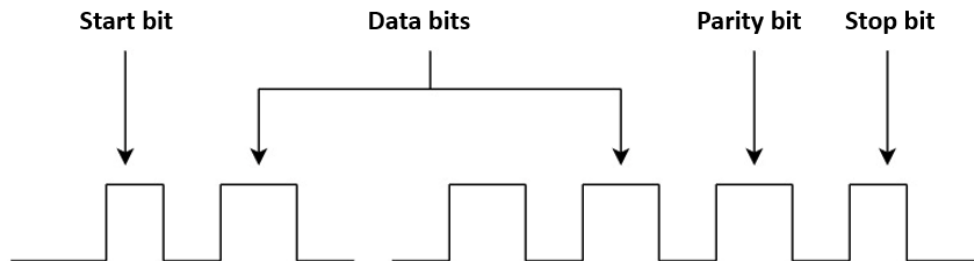


Figura 3.12: Transmissão assíncrona de dados em série; adaptado de [64].

É enviado um *byte* de dados, em que o *bit* de início é adicionado no começo desse *byte* e indica ao recetor que está pronto para enviar os dados, enquanto o *bit* de paragem está no fim desse *byte* e assinala o fim da transmissão. O *bit* de paridade é enviado antes do *bit* de paragem e é utilizado para verificar se ocorreu erros no envio dos dados. Caso o *bit* de paragem não for corretamente inserido, o recetor deteta um erro e assume que os dados estão corrompidos [64].

A comunicação RS-485 permite dois tipos de conexões, uma estabelecida por quatro fios em *full-duplex* e outra por dois fios em *half-duplex*. A comunicação é realizada pela diferença de tensão entre os condutores A e B, com a possibilidade de apresentarem um sinal de referência lógico 0 comum, designado *Ground*, que permite uma maior estabilidade e imunidade a ruídos [69].

3.6 Ethernet

A Ethernet é uma tecnologia de comunicação amplamente utilizada para a interligação de dispositivos em LAN, tendo sido originalmente desenvolvida por Robert Metcalfe na década de 1970. Desde então, tem vindo a consolidar-se como um dos principais padrões para transmissão de dados, graças à sua versatilidade, escalabilidade e compatibilidade com diversos meios físicos [70].

A sua principal função consiste em disponibilizar um meio físico e lógico padronizado para a comunicação entre equipamentos, tais como computadores, servidores, dispositivos industriais, entre outros. Atualmente, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) é a organização responsável por rever e atualizar as especificações do padrão Ethernet, incluindo taxas de transmissão e tipos de cablagem. A norma IEEE 802.3 define que, do ponto de vista da arquitetura de rede, esta tecnologia opera nas camadas um (i.e. física) e dois (i.e. ligação de dados) do modelo OSI [70], [71].

Cada dispositivo ligado à rede Ethernet possui um endereço *Media Access Control* (MAC) único, garantindo a identificação inequívoca dos equipamentos envolvidos na comunicação. O acesso ao meio de transmissão é tradicionalmente gerido através do método *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* (CSMA/CD), que assegura a transmissão de um dispositivo de cada vez, reduzindo a probabilidade de colisões e otimizando o fluxo de informação. Contudo, este mecanismo introduz tempos de espera aleatórios, o que compromete a previsibilidade e limita a sua adequação a aplicações com requisitos de tempo rigorosos [70], [71].

Ao longo do tempo, a Ethernet registou uma evolução significativa ao nível da velocidade de transmissão. As taxas de transmissão passaram de 10 *MegaBytes per Second* (Mb/s) para valores que atualmente ultrapassam os 100 *GigaBytes per Second* (Gb/s), de forma a dar resposta às crescentes exigências de largura de banda nos diferentes contextos de aplicação. Inicialmente, utilizava exclusivamente cabos coaxiais como meio de transmissão. No entanto, com os avanços tecnológicos, tornou-se compatível com cablagem de par trançado e fibra ótica, o que lhe confere maior flexibilidade e alcance [71].

No contexto industrial, a adoção da Ethernet deparou-se com diversos desafios, nomeadamente a necessidade de garantir uma comunicação fiável e com requisitos temporais rigorosos. Para responder a estas exigências, foram desenvolvidas extensões da Ethernet convencional, como EtherCAT, PROFINET, EtherNet/IP e Modbus TCP. Estas tecnologias incorporam mecanismos adicionais que permitem assegurar um desempenho adequado em ambientes industriais, onde a resposta em tempo real é essencial [71].

3.7 Equipamentos de Monitorização

Num sistema de monitorização de recursos, os equipamentos de monitorização desempenham um papel fundamental na recolha, processamento e transmissão de dados essenciais para a eficiência e otimização dos processos. De seguida, serão descritos os diferentes tipos de equipamentos, destacando a sua função e relevância na monitorização eficaz dos recursos.

3.7.1 Analisadores de energia

Os analisadores de energia, são equipamentos que permitem medir e monitorizar o consumo energético de circuitos elétricos. Estes dispositivos medem, em tempo real, valores da corrente e tensão de um circuito, através de ligações em série e paralelo com a carga a ser medida, respetivamente. Apresentam um sistema integrado de processamento, que permite a interpretação e manipulação dos valores obtidos, facultando o cálculo instantâneo de diversas variáveis elétricas, tais como potência ativa, reativa e aparente, energia, frequência, fator de potência, harmónicos, entre

outras. Além disto, possibilitam o registo e armazenamento dos dados das diferentes variáveis, incluindo valores máximos e mínimos, e capacitam a comunicação para um sistema central de monitorização. A Figura 3.13 apresenta um exemplo de analisador de energia, sendo este um modelo da Schneider Electric [45].



Figura 3.13: Exemplo de um analisador de energia - PM5110 [72].

Estes dispositivos são fundamentais na monitorização e gestão de consumos eléctricos em ambientes industriais, dado que o consumo é intensivo e o custo associado é elevado. Neste contexto, a utilização em grande escala destes equipamentos viabiliza a segmentação do consumo por áreas ou equipamentos, possibilitando uma análise mais granular, o que facilita a identificação de oportunidades de melhoria do consumo e a implementação de medidas de eficiência energética. Adicionalmente, proporcionam o aumento da fiabilidade e segurança das operações, visto que é possível detetar anomalias na rede eléctrica, prevenindo a ocorrência de falhas e tempos de inatividade dispendiosos [73], [74], [75].

Existem diversas soluções de analisadores de energia eléctrica no mercado, com diferentes graus de sofisticação e funcionalidades. A seleção de um analisador de energia para uma determinada aplicação exige uma análise criteriosa, dado que é necessário ter em conta as variáveis que se pretende monitorizar e a precisão das mesmas, a comunicação a estabelecer com o sistema de monitorização, custo-benefício, entre outros. Algumas soluções permitem o acionamento de alarmes com base em valores máximos e mínimos definidos pelo utilizador para determinadas variáveis eléctricas [74].

3.7.2 Transformadores de intensidade

Os Transformador de Intensidade (TI), de acordo com a norma *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61869-2, podem ser divididos em dois grupos: medição e de proteção. Estes apresentam uma estrutura semelhante e o mesmo princípio de funcionamento, que se baseia na indução eletromagnética da lei de Faraday. Os TI apresentam dois enrolamentos, designados de primário e secundário, encontrando-se o último à volta de um núcleo magnético, normalmente de ferro. Por sua vez, o primário é geralmente constituído pelo condutor, em cabo ou barra, que

advém da rede elétrica e alimenta um determinado circuito, como demonstrado no exemplo da Figura 3.14 que representa um TI de medição [76], [77], [78].

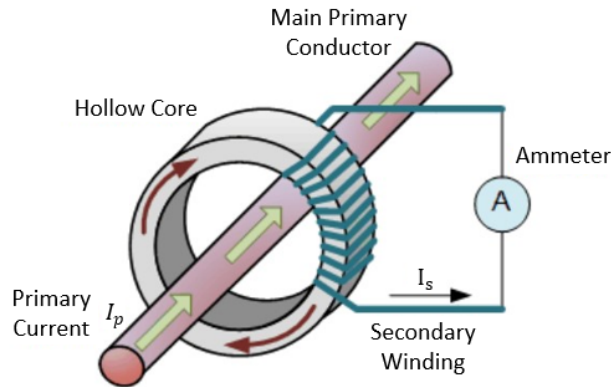


Figura 3.14: Aplicação do TI para medição; adaptado de [79].

Estes dispositivos trabalham exclusivamente com corrente alternada e são capazes de converter corrente alta em baixa. Assim, quando a corrente alternada atravessa o primário, é criado um campo magnético oscilante que é transferido ao longo do núcleo do TI e induz no secundário uma corrente proporcional. Deste modo, a corrente criada no secundário pode ser utilizada para medição ou proteção, sendo transferida para os respectivos dispositivos através do circuito do secundário do TI [77], [78].

A relação de transformação de um TI é determinada pela corrente que flui no primário e a desejada no secundário. Esta encontra-se descrita pela Equação 3.1, que permite calcular o número de espiras que o TI carece no secundário [78].

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K \quad (3.1)$$

Por sua vez, o primário apresenta normalmente um enrolamento, visto que é representado pelo condutor que advém da rede elétrica e atravessa o núcleo do TI. Por exemplo, para um TI com relação de transformação de 100/5, significa que quando o primário apresenta 100 A, a corrente presente no secundário é de 5 A. Tipicamente, um TI é projetado para operar corretamente até à sua corrente nominal no primário. No exemplo da relação 100/5, isso significa que a medição é fiável dentro da classe de precisão do TI até 100 A. Acima desse valor, a precisão deixa de estar garantida e o equipamento pode sofrer sobreaquecimento [78].

Existem vários tipos de TI, porém, os TI de janela, como os representados na Figura 3.15, são dos mais utilizados e podem apresentar núcleo fechado ou aberto, onde o cabo ou barramento de alimentação de um circuito atravessa o núcleo do TI e corresponde ao primário do mesmo [79], [80], [81].

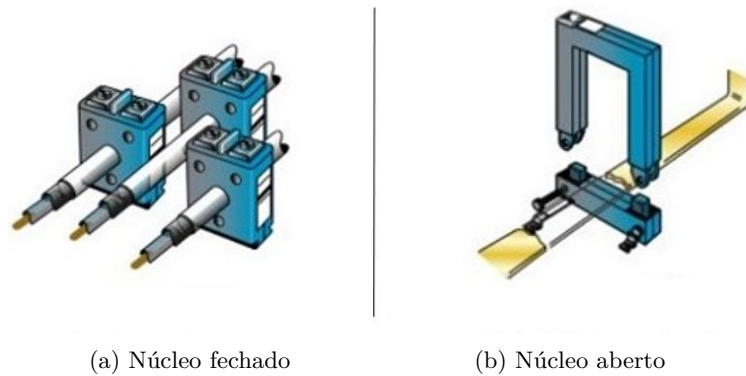


Figura 3.15: TI do tipo janela; adaptado de [79].

O TI de núcleo fechado, ilustrado na Figura 3.15a, exige que a sua instalação careça de um corte de energia do circuito a medir, visto que é necessário retirar o circuito da respetiva proteção, de modo que se consiga colocar o TI. Por sua vez, o TI de núcleo aberto, exibido na Figura 3.15b, permite que o mesmo seja instalado sem que haja um corte de energia para o efeito, dado que quando o núcleo se apresenta aberto, este pode ser instalado à volta do circuito a medir e fechado aquando da colocação. Além disso, é imprescindível que sejam tomados os respetivos cuidados na instalação dos TI de núcleo aberto, visto que há presença de corrente na rede [79], [80], [81].

É fundamental garantir que, ao utilizar um TI, o circuito secundário se encontre devidamente conectado a uma carga ou a um equipamento de medição, enquanto o mesmo estiver em operação. De outro modo, se o secundário permanecer aberto durante o funcionamento, apenas existe fluxo de corrente no circuito primário, o que provoca uma elevada tensão no secundário. Isto, pode representar riscos de segurança para as pessoas e comprometer o funcionamento do equipamento. Posto isto, caso não seja possível conectar o circuito secundário, deve ser feito um *shunt* no mesmo, de modo a evitar os perigos suprarreferidos [82].

O que diferencia os TI de medição e proteção é essencialmente a aplicação em que se inserem e a classe de precisão. Quanto à sua aplicação, os TI de medição são concebidos para serem integrados com dispositivos de medida, como analisadores de energia, amperímetros, voltímetros, wattímetros, entre outros. Por sua vez, os TI de proteção são talhados para serem incorporados com dispositivos de proteção, como relés de proteção e disjuntores. No que diz respeito à precisão dos TI, aqueles que são aplicados à medição requerem mais precisão de leitura em relação aos de proteção. Assim, são atribuídas diferentes classes de precisão a cada uma das aplicações, como apresentado na Tabela 3.2 e Tabela 3.3 [76].

Tabela 3.2: Classes de precisão dos TI para monitorização; adaptado de [76].

Accuracy Class	Ratio Error at % of Rated Current ($\pm\%$)					
	1	5	20	50	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	-	0,2	0,2
0,5 S	1,5	0,75	0,5	-	0,5	0,5
0,1	-	0,4	0,2	-	0,1	0,1
0,2	-	0,75	0,35	-	0,2	0,2
0,5	-	1,5	0,75	-	0,5	0,5
1	-	3	1,5	-	1	1
3	-	-	-	3	-	3
5	-	-	-	5	-	5

Tabela 3.3: Classes de precisão dos TI para proteção; adaptado de [76].

Accuracy Class	Ratio Error at Rated Current ($\pm\%$)	Composite Error at Rated Accuracy Limit Current (%)
5P	1	5
10P	3	10

As classes de precisão para os TI de medição são definidas na gama de valores entre 0,1 e 5, sendo que a 3 e 5 são as menos utilizadas, visto que já conferem um certo nível de erro na leitura. O erro de leitura dos TI, para uma dada classe de precisão, varia conforme o valor da corrente que o primário alberga face à corrente máxima que o TI permite medir. O erro pode ser calculado através da Equação 3.2, em que primeiramente se faz a diferença entre o valor da corrente no secundário multiplicado pela relação de transformação e o valor da corrente no primário e, posteriormente, a divisão deste valor pela corrente no primário [76].

$$\varepsilon = \frac{kI_S - I_P}{I_P} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Além disto, este valor deve ainda ser multiplicado por 100, se o mesmo for pretendido em percentagem [76].

3.7.3 Conversores TCP/IP

Os conversores TCP/IP, ou *gateways*, desempenham um papel preponderante na integração de dispositivos em redes industriais, visto que a maior parte opera exclusivamente com comunicações série. Estes equipamentos permitem a conversão de sinais provenientes de interfaces de comunicação série, como o RS-485, para protocolos de rede Ethernet, viabilizando a transmissão eficiente de dados entre

dispositivos de medição e a infraestrutura de rede local ou remota, conforme ilustrado na Figura 3.16 [83].

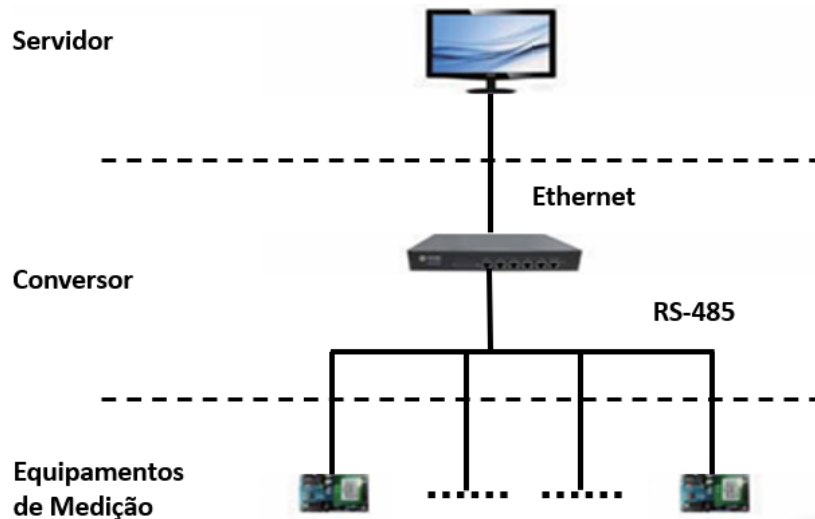


Figura 3.16: Aplicação de um conversor TCP/IP; adaptado de [83].

Entre os diversos modelos disponíveis, os conversores TCP/IP que suportam o protocolo Modbus destacam-se pela sua versatilidade e ampla utilização em aplicações industriais. Estes dispositivos facilitam a integração entre Modbus RTU (RS-485) e Modbus TCP (Ethernet), oferecendo uma solução prática e confiável para a interoperabilidade de sistemas. De modo a assegurar uma comunicação eficaz e evitar conflitos entre os diversos equipamentos, é necessário configurar os parâmetros de comunicação do conversor, como os *bits* de dados, taxa de transmissão, paridade, endereço IP, entre outros. Uma vez configurado, este equipamento atua como servidor Modbus TCP e encontra-se apto para a transferência de dados entre os equipamentos de medição e o servidor de controlo, por exemplo um sistema SCADA [45].

No contexto do presente projeto, os conversores TCP/IP permitem conectar os diversos analisadores de energia e caudalímetros à rede local da fábrica. Esta configuração proporciona a centralização dos dados de consumo num servidor de gestão, viabilizando uma monitorização eficiente e escalável. Além disto, a integração dos dados através destes conversores faculta a análise avançada das informações obtidas, permitindo a tomada de decisões fundamentadas com base no histórico de valores e medições em tempo real.

3.7.4 Sensores de caudal

Os sensores de caudal, também designados por caudalímetros, são equipamentos utilizados na medição da quantidade de fluído num dado ponto de um sistema, com base no volume ou na massa por unidade tempo. São amplamente empregues

na indústria para monitorizar e controlar processos que envolvem líquidos ou gases. Estes dispositivos oferecem vantagens operacionais e financeiras, como o aumento da eficiência dos processos, deteção de fugas, otimização do perfil de consumo do recurso medido e planeamento de manutenções. Conforme a representação da Figura 3.17, os sensores de caudal podem ser classificados em dois principais tipos: volumétricos, que determinam o volume do fluído, e de massa térmica, que medem diretamente a massa do fluído [84], [85].

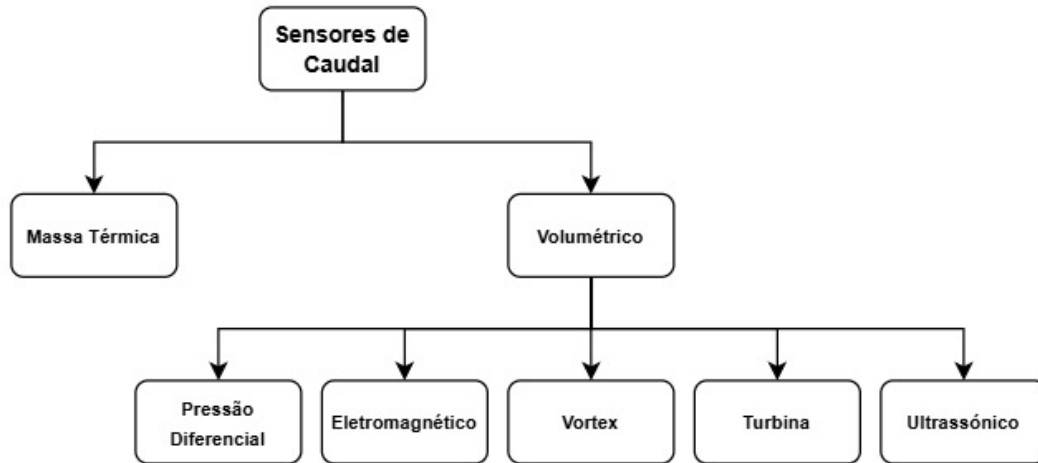


Figura 3.17: Tipos de sensores de caudal; adaptado de [85].

Na gama dos caudalímetros volumétricos, destacam-se o ultrassónico, o de pressão diferencial e o eletromagnético, devido à sua elevada precisão e eficiência em comparação com os demais. Por sua vez, os sensores de caudal de massa térmica são vastamente considerados a referência para a monitorização e controlo de processos em ambientes de produção industrial, devido à sua fiabilidade e aplicabilidade em diversas condições [85], [86].

Na seleção de um sensor de caudal para determinada aplicação, é necessário considerar fatores como o fluído a medir e as suas características operacionais, como pressão, temperatura e outros parâmetros relevantes, o diâmetro da tubagem no ponto de instalação, os valores requeridos, assim como a repetibilidade e a precisão dos dados. Adicionalmente, no contexto do tema do presente projeto, é relevante que o caudalímetro apresente capacidade de comunicação dos dados adquiridos para uma plataforma ou base dados, permitindo a monitorização remota em tempo real. Tendo em consideração os fatores suprarreferidos, é igualmente importante determinar o modo de instalação mais rentável e eficiente para o ponto de medição. Para tal, os sensores de caudal podem ser instalados de três modos diferentes:

- Linha - integrado num novo segmento de tubagem, que é implementado por *bypass* no ponto que se pretende medir. A instalação requer a interrupção do funcionamento do sistema e o corte da tubagem original;

- Inserção - introduzido diretamente na tubagem através de uma abertura, sendo possível, em determinadas situações, a utilização da técnica de *hot tapping* para realizar a instalação sem a necessidade de despressurizar o sistema;
- Exterior - instalado externamente à tubagem, eliminando a necessidade de intervenção direta na estrutura da mesma e na operação do sistema, o que o torna particularmente ideal para aplicações temporárias [86].

3.8 Servidores

Os servidores constituem elementos centrais em qualquer infraestrutura de rede, assumindo um papel preponderante na disponibilização de serviços e recursos a outros dispositivos, designados por clientes. Esta relação está subjacente ao modelo cliente-servidor, amplamente utilizado na comunicação entre sistemas, no qual o servidor responde aos pedidos efetuados pelos clientes conectados à mesma rede [87].

Em termos gerais, um servidor pode ser percecionado sob duas perspetivas complementares: enquanto dispositivo físico (i.e. *hardware*) e como entidade lógica (i.e. *software*). Na sua vertente física, um servidor corresponde a um equipamento informático conectado a uma rede, no qual são executados um ou mais serviços disponibilizados por *software*, em conjunto com o sistema operativo. Estes dispositivos são frequentemente designados por *hosts* e, em princípio, qualquer computador com os recursos adequados pode assumir essa função [88].

Por sua vez, na ótica do *software*, um servidor refere-se a um programa que oferece serviços específicos a outros programas, denominados clientes, podendo esta comunicação ocorrer localmente ou através de uma rede. O tipo de serviço prestado determina a natureza do servidor, permitindo classificá-los em diversas categorias, como servidores de ficheiros, de bases de dados, de impressão, *web*, ou servidores em nuvem, que alojam máquinas virtuais. A troca de informação entre clientes e servidores é realizada através de protocolos de comunicação adequados a cada tipo de serviço [87], [88].

Capítulo 4

Caso de Estudo

Neste capítulo será apresentado o caso de estudo que fundamenta o desenvolvimento do projeto. Deste modo, inicia-se com uma descrição detalhada das instalações onde o sistema será implementado, seguida pela exposição dos processos produtivos envolvidos. Posteriormente, será realizada a caracterização das infraestruturas de suporte aos recursos que se pretende monitorizar no âmbito do presente projeto, com especial enfoque na rede elétrica, de ar comprimido e de azoto. Por fim, serão definidos os requisitos do sistema, culminando na proposta de uma solução adequada às necessidades identificadas.

4.1 Descrição das Instalações

O caso de estudo do presente projeto são as instalações da Bosch Security Systems – Sistemas de Segurança, S.A., que se encontram organizadas por áreas, como demonstrado no Anexo A.1, as quais são destinadas às seguintes finalidades:

- Produção;
- Escritórios e salas de reunião;
- Laboratórios;
- Armazém de matérias-primas e produto acabado;
- Áreas sociais, que incluem instalações sanitárias, balneários e vestiários separados por género, refeitórios, entre outras;

- Áreas técnicas, que englobam o edifício de compressores, a oficina de infraestruturas, o parque de resíduos, o armazém de produtos químicos, entre outras.

De seguida, serão apresentados os processos produtivos incorporados na área industrial em estudo, visto que a área de produção é a principal responsável pelo consumo de recursos da fábrica.

4.2 Apresentação dos Processos Produtivos

Em qualquer tipo de transformação industrial, a entrada de matéria-prima é imprescindível para o desempenho da mesma. No presente caso de estudo, a matéria-prima, constituída por rolos de componentes, componentes de maiores dimensões, *Printed Circuit Board* (PCB) virgens e elementos plásticos/metálicos para assemblagem, dá entrada nas instalações e é armazenada com recurso a empilhadores e *stackers*. Posteriormente, com a utilização de carros de transporte logístico com caruagens, é transportada desde o local de armazenamento até aos respetivos pontos de abastecimento da área de produção.

A atividade produtiva desta unidade industrial pode ser dividida em três processos principais:

- *Surface Mount Technology* (SMT);
- *Through Hole Technology* (THT);
- *Final ASsembly* (FAS).

Nos pontos que se seguem vão ser abordados os processos mencionados acima quanto ao seu funcionamento.

4.2.1 Processo Surface Mount Technology

O processo SMT consiste na assemblagem de componentes eletrónicos à superfície do PCB, designados por *Surface Mount Device* (SMD), que se tem vindo a destacar a nível industrial. Isto, prende-se devido ao facto de permitir a redução dos custos de montagem, gestão mais eficiente do espaço do circuito impresso pelo que permite manipular componentes mais pequenos e a repetibilidade conferida devido ao maior nível de automatização presente no processo. Na Figura 4.1 está presente uma estrutura convencional de uma linha de montagem SMT [89], [90].

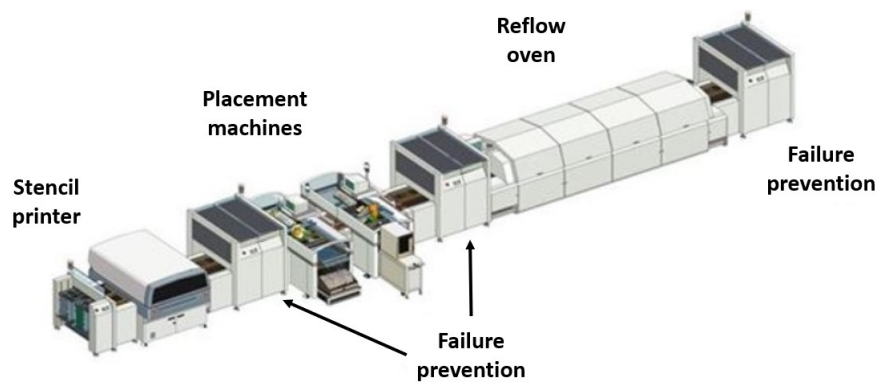


Figura 4.1: Estrutura convencional de uma linha de montagem SMT; adaptado de [91].

Este processo apresenta uma sucessão de etapas operacionais, como representado no diagrama da Figura 4.2, sendo as mesmas explicadas de seguida.

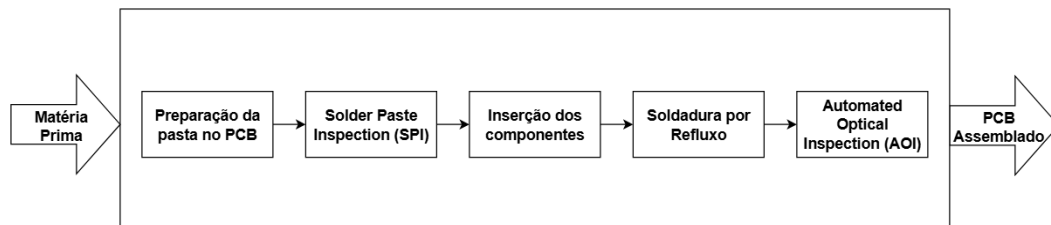


Figura 4.2: Diagrama do processo SMT.

Aplicação de pasta

A etapa inicial do processo SMT consiste na aplicação de pasta de solda e/ou pontos de cola, realizada através da técnica de serigrafia por uma máquina designada *printer*, como a que se encontra representada na Figura 4.3 [89].



Figura 4.3: Máquina utilizada na passagem de pasta - *Printer*.

Para este efeito, recorre-se a um utensílio denominado *squeegee*, responsável por distribuir uma pequena quantidade de pasta sobre o PCB. Este processo é efetuado com o auxílio de uma chapa metálica (i.e. *stencil*), posicionada sobre a placa e dotada de aberturas que permitem a deposição da pasta apenas nas áreas correspondentes às *pads* dos componentes. Apesar da sua aparente simplicidade, esta etapa assume uma importância crucial no resultado do processo, uma vez que a aplicação da pasta constitui a principal origem de defeitos numa linha de montagem SMT. Por isto, torna-se pertinente destacar a etapa seguinte [89].

Solder Paste Inspection

O modo de aplicação da pasta no PCB afeta diretamente a qualidade da soldadura dos componentes colocados posteriormente. Dado isto, torna-se preponderante a implementação de um instrumento ótico denominado *Solder Paste Inspection* (SPI), imediatamente após a deposição da pasta. Este equipamento permite, através da captura de imagens tridimensionais da placa, conforme ilustrado na Figura 4.4, verificar a disposição da pasta em conformidade com o *design* do *stencil* utilizado [90], [92].



Figura 4.4: Dispositivo utilizado na inspeção da pasta - SPI.

Através desta análise, é possível determinar as características da pasta nas *pads* e identificar potenciais defeitos no processo de aplicação. A deteção precoce destas imprecisões possibilita uma redução significativa da taxa de defeitos de produção, bem como dos custos associados à reparação ou retrabalho [90], [92].

Inserção de componentes

A inserção dos componentes no PCB é realizada por máquinas denominadas *Pick and Place*, como a representada na Figura 4.5, após a correta aplicação da pasta de solda [89].



Figura 4.5: Máquina *Pick and Place*.

Estas máquinas utilizam uma peça designada *nozzle*, elemento-chave responsável por transportar os componentes e posicioná-los no PCB através de um mecanismo de sucção a vácuo. Este processo pode atingir velocidades relativamente elevadas, garantindo elevada produtividade. Os componentes são fornecidos à máquina através de *feeders*, compostos por *reels* ou outros tipos de distribuidores, a partir dos quais são recolhidos de forma automática para a montagem do PCB. Uma vez inseridos na pasta de solda previamente aplicada, os componentes mantêm-se fixos no local devido à adesão da própria pasta, desde que a placa não sofra movimentações bruscas [89].

Soldadura por refluxo

Após a inserção dos componentes no PCB, segue-se a etapa de soldadura por refluxo. Durante esta fase, as placas passam por um forno de refluxo, como o apresentado na Figura 4.6, no qual são consolidadas todas as ligações elétricas entre os componentes e as respetivas *pads*, assegurando a sua fixação no PCB [93].



Figura 4.6: Forno de refluxo.

A variação da temperatura ao longo do forno exerce influência direta na qualidade da soldadura. Assim, em função das propriedades da pasta utilizada, torna-se essencial definir um perfil térmico de refluxo adequado, de modo a obter juntas de solda fiáveis sem comprometer os componentes ou o conjunto devido a calor excessivo. De forma geral, a temperatura máxima não deve exceder os 250 °C. O processo de soldadura por refluxo divide-se habitualmente em quatro fases principais, descritas em seguida:

1. Pré-aquecimento - aumento gradual da temperatura, garantindo que todos os componentes e o PCB sejam aquecidos correta e uniformemente;
2. Imersão - manutenção da temperatura durante um intervalo específico, assegurando que todos os componentes atingem o nível térmico necessário antes da fusão da pasta;
3. Refluxo - a temperatura encontra-se acima do ponto de fusão da pasta, permitindo que a mesma passe ao estado líquido, formando as juntas de solda. A estabilidade da temperatura nesta fase é crucial para a obtenção de ligações de elevada qualidade;
4. Arrefecimento - redução gradual da temperatura, permitindo a solidificação da solda e a fixação definitiva dos componentes ao PCB [89], [90], [93], [94].

Automated Optical Inspection

Por vezes, uma movimentação incorreta da placa durante a etapa de soldadura por refluxo pode resultar em defeitos de qualidade, como ligações deficientes ou mesmo a ausência total de união da pasta de solda. Para mitigar estes riscos, a fase final do processo SMT consiste na inspeção tridimensional do PCB, realizada por um equipamento *Automated Optical Inspection* (AOI), conforme exibido na Figura 4.7.



Figura 4.7: Equipamento utilizado na inspeção final do PCB - AOI.

Esta etapa permite avaliar a qualidade da solidificação das juntas de solda, bem como a correta inserção dos componentes na placa. Adicionalmente, o sistema AOI pode também ser integrado em algumas linhas de montagem antes da fase de soldadura por refluxo, assegurando que todos os componentes se encontram devidamente posicionados [89].

Atualmente, encontram-se instaladas 13 linhas de montagem SMT no chão de fábrica das instalações, na área OVR109, distribuídas conforme ilustrado na Figura 4.8.

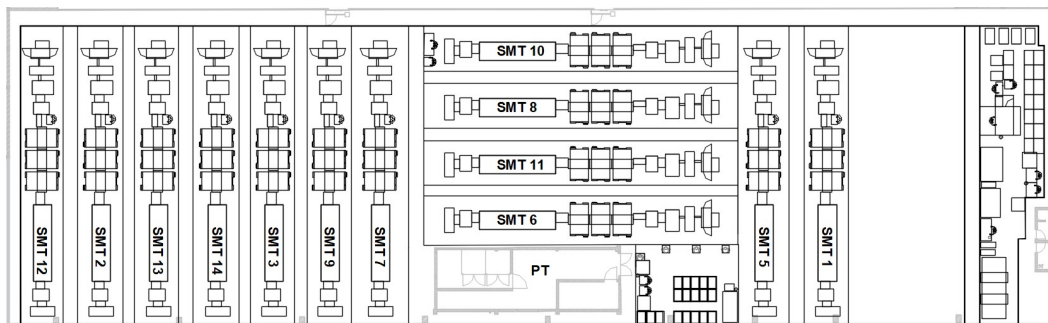


Figura 4.8: *Layout* atual das linhas SMT no chão de fábrica.

No entanto, perspectiva-se que futuramente o *layout* desta área vai sofrer uma alteração na sua organização, sendo integradas duas novas linhas de montagem, como representado na Figura 4.9.

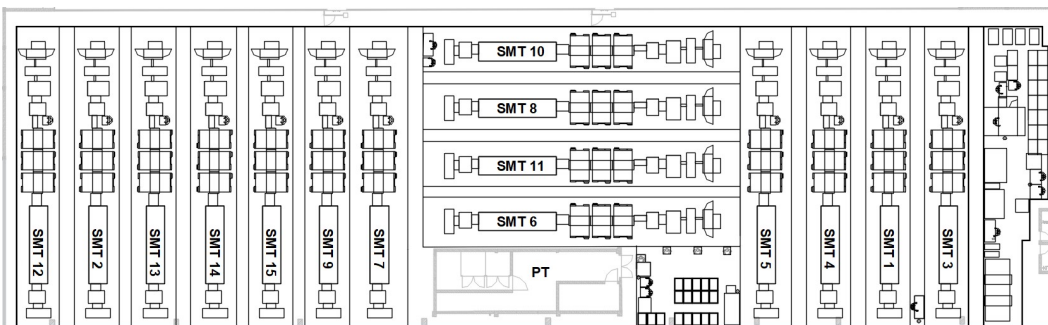


Figura 4.9: *Layout* futuro das linhas SMT no chão de fábrica.

4.2.2 Processo Through Hole Technology

À imagem do processo abordado anteriormente, o processo THT consiste na montagem de componentes eletrônicos num PCB, no entanto, apresenta a particularidade de os pinos dos componentes atravessarem a placa através de furos presentes na mesma. Deste modo, os componentes são consolidados mecânica e eletricamente na face oposta da placa, sendo uma boa escolha para aplicações que exijam alta fiabilidade, durabilidade e sujeitos a ambientes agrestes. De modo a compreender o processo THT, vão ser apresentadas, de forma sucinta, as etapas que o compõem, as

quais serão explicadas de seguida, dado que o diagrama da Figura 4.10 representa a estrutura do processo no presente caso de estudo [95].

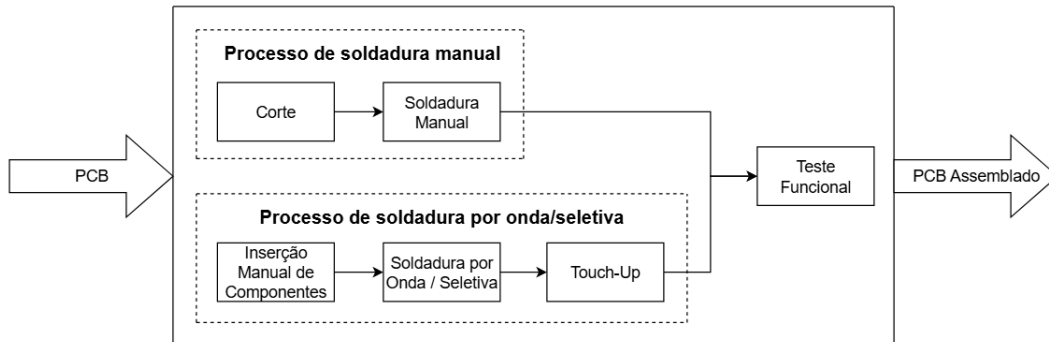


Figura 4.10: Diagrama do processo THT.

Corte de placas

Consiste na separação das placas obtidas a partir do processo SMT, denominadas de *multiboards*, em unidades individuais, ou *singles*. Esta operação pode ser realizada utilizando-se uma lâmina ou através de destaque manual. A utilização de *multiboards*, como a representada na Figura 4.11, permite aumentar a eficiência do processo, contribuindo para a melhoria da produtividade, redução de custos, otimização do espaço, escalabilidade, entre outros [95].

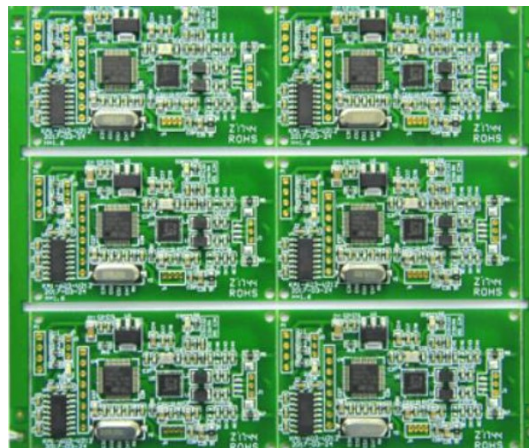


Figura 4.11: Exemplo de *multiboard* proveniente do processo SMT [96].

Inserção dos componentes

Contrariamente aos componentes que são inseridos no processo SMT, que são soldados à superfície do PCB, os componentes deste processo necessitam de atravessar a placa através dos furos presentes na mesma. A inserção destes componentes é

uma etapa minuciosa e complexa, suscetível a influências de diversos fatores, nomeadamente as variações de dimensão e formato dos componentes. Por este motivo, a operação é normalmente realizada manualmente por operadores especializados [95].

Soldadura de componentes THT

Esta etapa é responsável pela consolidação elétrica e mecânica dos componentes na placa, realizada através da aplicação de solda nos locais apropriados. A execução pode ocorrer segundo três métodos distintos, apresentados na Figura 4.12, dependendo do tipo de componentes envolvidos:

- Manual - o operador humano realiza a soldadura dos componentes com o auxílio de um ferro de soldar, conforme ilustrado na Figura 4.12a;
- Onda - a face do PCB que contém os pinos dos componentes THT é imersa num banho de solda, como representado na Figura 4.12b, onde ocorre a respetiva solidificação;
- Seletiva - a solda é aplicada por uma máquina em regiões específicas da placa, conforme evidenciado na Figura 4.12c. Este método é particularmente útil em aplicações que exigem elevada precisão, como a soldadura de componentes difíceis de soldar por onda, podendo ser aplicado a diferentes tipos de componentes [95].

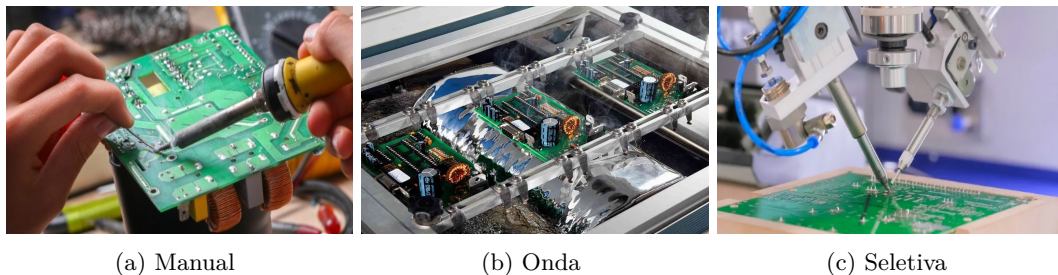


Figura 4.12: Tipos de soldadura no processo THT; adaptado de [97], [98], [99].

Teste de funcionamento

Esta etapa ocorre antes da montagem do produto final e consiste em submeter o PCB a uma verificação funcional, com o objetivo de assegurar que cumpre os requisitos técnicos definidos pelo fabricante [95].

4.2.3 Processo Final Assembly

O processo FAS caracteriza-se por ser a última fase que o produto passa antes de ser enviado para o cliente. Conforme o diagrama da Figura 4.13, este processo

recebe o produto assemblado que advém dos processos abordados anteriormente e são realizadas as etapas de montagem, teste final e embalagem que permitem assegurar a funcionalidade, qualidade, fiabilidade e integridade do produto.

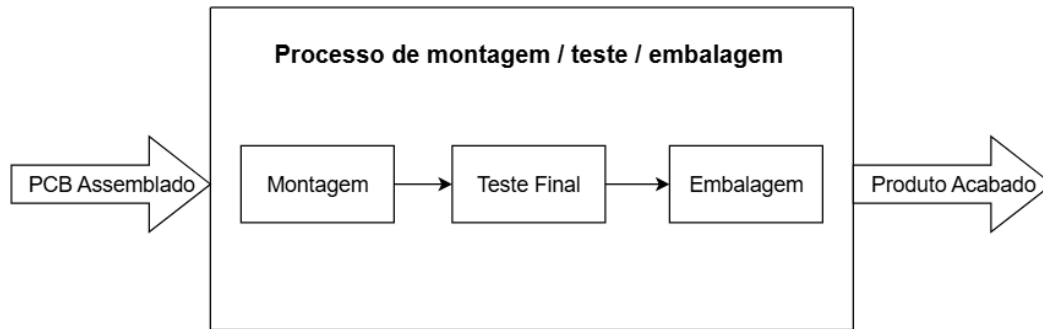


Figura 4.13: Diagrama do processo FAS.

4.3 Caracterização das Infraestruturas

Neste tópico, serão descritas as infraestruturas que suportam a distribuição dos recursos necessários para o bom funcionamento da fábrica, com principal destaque para a área de produção, nomeadamente a rede elétrica, ar comprimido e nitrogénio. Adicionalmente, as instalações dispõem de uma rede de água, a qual, contudo, não será objeto de análise por não constituir um recurso com consumo expressivo.

4.3.1 Rede elétrica

A energia elétrica desempenha um papel preponderante na indústria, na medida que suporta todo o tipo de atividades que nela se realizam, tais como a produção, climatização, iluminação, entre outras. Além disto, os preços finais dos produtos e/ou serviços entregues ao cliente final acabam por ser influenciados pelo consumo de energia decorrente do processo utilizado.

A unidade industrial do presente caso de estudo apresenta desde 2020 um fornecimento de energia elétrica exclusivamente de origem renovável, que alicerça os objetivos da organização no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável e redução da pegada ecológica. A entidade responsável pelo fornecimento da energia elétrica é a Acciona Energia, sendo que a energia chega às instalações por meio de uma rede de MT em regime trifásico de 15 kV. No Posto de Transformação (PT) encontra-se instalado um transformador de 1 600 kVA que permite converter a rede MT para a de Baixa Tensão (BT), de modo que seja possível alimentar os circuitos necessários para o funcionamento dos equipamentos. De modo a suportar a rede de BT, estão instalados dois Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) no PT, como ilustrado na Figura 4.14.



Figura 4.14: Localização dos QGBT no PT.

O QGBT novo, identificado na Figura 4.14a, recebe energia diretamente do transformador e, conseqüentemente, alimenta o QGBT antigo, apresentado na Figura 4.14b. Em conjunto, estes quadros asseguram o fornecimento elétrico a todas as áreas do parque industrial, excetuando as pertencentes ao condomínio. As nomenclaturas estão assim definidas devido à expansão que a fábrica sofreu, dado que o único QGBT instalado na altura não permitia colmatar as necessidades que surgiram do crescimento das instalações no que toca à potência necessária para o bom funcionamento da unidade industrial e, deste modo, foi implementado um QGBT novo.

De forma a eliminar a energia reativa que possa ser injetada na rede elétrica, que se revela um gasto adicional na respetiva fatura, estão instaladas duas baterias de condensadores junto aos QGBT, correspondendo cada uma a cada um dos QGBT. As baterias de condensadores têm vindo a assumir um papel importantíssimo nas instalações elétricas, uma vez que, operam como geradores que fornecem aos equipamentos elétricos a energia reativa essencial para a manutenção do campo eletromagnético. Além disto, permitem a redução de perdas ativas e quedas de tensão na instalação e ajudam a otimizar a potência contratada, na medida que, reduzindo a potência reativa, possibilita uma melhoria do fator de potência e, deste modo, contribuem para a eficiência energética.

Adicionalmente, para auxiliar a alimentação de alguns equipamentos críticos, especialmente no caso de ocorrer uma falha de energia por algum motivo, encontram-se instaladas quatro *Uninterruptible Power Supply* (UPS) nas instalações do caso de estudo. Estas permitem proteger diferentes tipos de equipamentos de problemas associados à má qualidade da energia elétrica ou a uma perda total de energia e, caso

estes ocorram, garantir que os dispositivos permaneçam operacionais. As UPS instaladas apresentam um banco de baterias que se encontra a carregar continuamente, de modo que quando seja necessário, este se apresente na sua capacidade máxima de autonomia para alimentar o circuito durante um certo período. Caso este ultrapasse o definido pelo fabricante para o *backup*, a UPS desliga-se para evitar uma descarga total das baterias. Uma vez que a tensão da linha seja restaurada, a UPS arranca novamente, alimentando automaticamente a carga crítica e recarregando o banco de baterias. As UPS que se encontram implementadas apresentam o princípio de funcionamento representado na Figura 4.15 e estão atribuídas da seguinte forma:

- Uma UPS de 160 kVA que alimenta, à exceção do forno, as máquinas e os *conveyors* das linhas SMT, de modo a assegurar que, em caso de falha de energia, o PCB realize o seu ciclo de produção normal, evitando que o mesmo se danifique;
- Uma UPS de 10 kVA designada para os circuitos de emergência da fábrica, nomeadamente, sinalizações de emergência, portas e portões de emergência, circuitos de iluminação atribuídos para que as pessoas consigam evacuar caso necessário, entre outros;
- Duas UPS de 10 kVA que alimentam os servidores que suportam o departamento de *Information Technology* (IT), sendo utilizadas duas por redundância, visto se tratar de uma aplicação imprescindível para o bom funcionamento e segurança da organização.

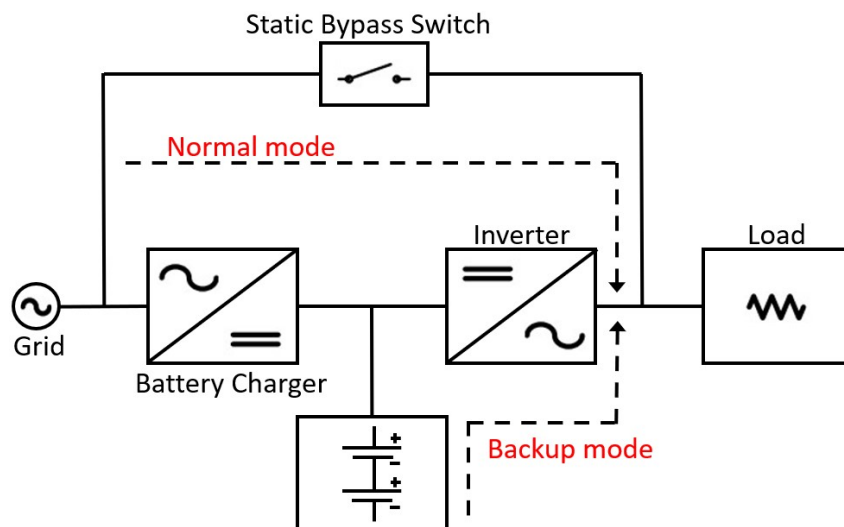


Figura 4.15: Representação do funcionamento das UPS instaladas; adaptado de [100].

Futuramente, perspetivando uma possível expansão do parque industrial e o estado atual do transformador instalado, que se encontra no limiar do seu funcionamento recomendado, vai ser adquirido um novo transformador de 1 000 kVA que irá alimentar um novo QGBT.

Neste projeto, procedeu-se à alteração da nomenclatura dos quadros elétricos, uma vez que a designação anteriormente utilizada era familiar apenas para os colaboradores da fábrica, porém, carecia de clareza para visitantes ou profissionais externos que nela realizassem trabalhos. Assim, a nomenclatura dos quadros elétricos foi reformulada de acordo com o modelo ilustrado na Figura 4.16.

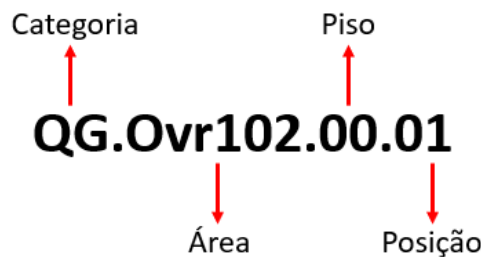


Figura 4.16: Novo modelo de nomenclatura dos quadros elétricos.

Este modelo apresenta a informação do quadro elétrico em relação a quatro campos:

- Categoria - indica se o quadro elétrico é diretamente alimentado por um dos QGBT instalados, sendo designado como Quadro Geral (QG), ou se recebe alimentação de outro quadro, caso em que é classificado como Quadro Parcial (QP);
- Área - especifica a área onde o quadro elétrico está localizado;
- Piso - refere o piso em que o quadro está instalado;
- Posição - consoante os quadros principais definidos para cada área, os restantes quadros dessa área são numerados sequencialmente no sentido horário.

Na Tabela 4.1 são demonstrados exemplos de alterações efetuadas nas nomenclaturas de alguns quadros elétricos instalados no caso de estudo.

Tabela 4.1: Exemplos de alterações nas nomenclaturas de alguns quadros elétricos.

Antiga Nomenclatura	Nova Nomenclatura
Q.ESC	QG.Ovr101.00.01
Q.0.1.1	QP.Ovr102.00.02
Q.AI 1	QG.Ovr104.01.01
Q.A.1.1	QP.Ovr108.01.01
QGBT Antigo	Q.G.B.T.1
QGBT Novo	Q.G.B.T.2

Sistema UPAC

Na vertente da rede de energia elétrica, a Bosch Security Systems apresenta uma Unidade de Produção para AutoConsumo (UPAC) desde setembro de 2022, que se revela interessante para os objetivos sustentáveis e rentáveis da empresa. Este sistema fundamenta-se numa instalação de produção de energia elétrica a partir de energias renováveis, no presente caso é fotovoltaica, destinada ao autoconsumo na instalação de utilização associada, com a possibilidade de injetar excedentes na Rede Elétrica de Serviço Público (RESP). A produção de energia elétrica que advém desta aplicação é exclusivamente destinada para autoconsumo e é injetada no QGBT novo, com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica proveniente da RESP. Esta UPAC encontra-se instalada nas coberturas das áreas OVR104 e OVR109, conforme ilustrado na Figura 4.17, e apresenta um conjunto de dispositivos e características, que se encontram representadas na Tabela 4.2, que lhe confere uma potência total instalada de 934,13 *KiloWatt Peak* (kWp).



Figura 4.17: Painéis instalados na cobertura da área de produção.

Tabela 4.2: Características da UPAC instalada.

Características UPAC instalada	
Número de módulos JA Solar JAM72S30-545/MR	1 714
Potência unitária do módulo [Wp]	545
Potência total instalada [kWp]	934,13
Potência nominal de saída [kW]	770
Potência nominal de saída do inversor [kW]	110
Número de Inversores Sungrow	7

Entre os dispositivos responsáveis pelo funcionamento desta UPAC, destacam-se os 1 714 módulos solares e sete inversores, dado que os últimos permitem converter a energia elétrica produzida pelos módulos fotovoltaicos na forma de corrente contínua em corrente alternada, encontrando-se instalados no PT, tal como demonstrado na Figura 4.18.



Figura 4.18: Inversores instalados no PT.

A potência de cada inversor em corrente alternada varia de acordo com a sua curva de rendimento e com a potência de entrada para conversão. Por sua vez, a potência produzida por cada conjunto de módulos depende da temperatura dos módulos, da irradiação solar incidente e da tensão de funcionamento dos módulos.

No sentido de uma redução acrescida da energia contratada à RESP, foi instalada uma nova UPAC, ocupando praticamente toda a cobertura da área OVR117, construída no início do ano de 2023. Esta unidade apresenta uma capacidade total instalada de 228,8 kWp, composta por 416 módulos fotovoltaicos de 550 W e três inversores, um de 110 kW e dois de 40 kW cada, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Características da UPAC nova.

Características UPAC nova	
Número de módulos LONGI LR5-72 HIH 550M G2	416
Potência unitária do módulo [Wp]	550
Potência total instalada [kWp]	228,8
Potência nominal de saída [kW]	190
Potência nominal de saída do inversor SG110CX [kW]	110
Número de Inversores SG110CX	1
Potência nominal de saída do inversor SG40CX [kW]	40
Número de Inversores SG40CX	2

Software de monitorização da UPAC

Aquando da implementação do projeto fotovoltaico, foi proposto o *software* de monitorização iSolarCloud da Sungrow que é amplamente utilizado em projetos fotovoltaicos da dimensão do caso de estudo e compatível com os inversores utilizados. Este permite que o utilizador consiga acompanhar o desempenho da central fotovoltaica e retire certas ilações a respeito, nomeadamente:

- Avaliar a produção de energia fotovoltaica, quer total como ao nível de cada inversor;
- Identificar a ocorrência de alguma falha na rede elétrica ou nos equipamentos envolvidos na UPAC;
- Verificar os parâmetros relativos à produção de energia fotovoltaica em tempo real, tais como a tensão e corrente contínua e alternada em cada fase, potência ativa e reativa, entre outros;
- Comparar o consumo total da instalação face à energia produzida;
- Visualizar e criar relatórios diários, semanais, mensais ou anuais de qualquer característica do sistema fotovoltaico.

Dito isto, é possível visualizar os dados que se apresentam descritos de seguida, através do *dashboard* do *software* que se encontra representado na Figura 4.19:

- Potência elétrica, em tempo real, fornecida pelo sistema UPAC e pela rede às instalações;
- Retorno monetário que advém da produção de energia solar;

- Segmentação do consumo total de energia elétrica da fábrica pela energia produzida pelos painéis solares e da que advém da rede;
- Gráfico com os dados obtidos de 5 em 5 minutos, referentes aos consumos das instalações e à incidência de radiação solar, sendo possível exportar essa informação em formato de excel ou csv.

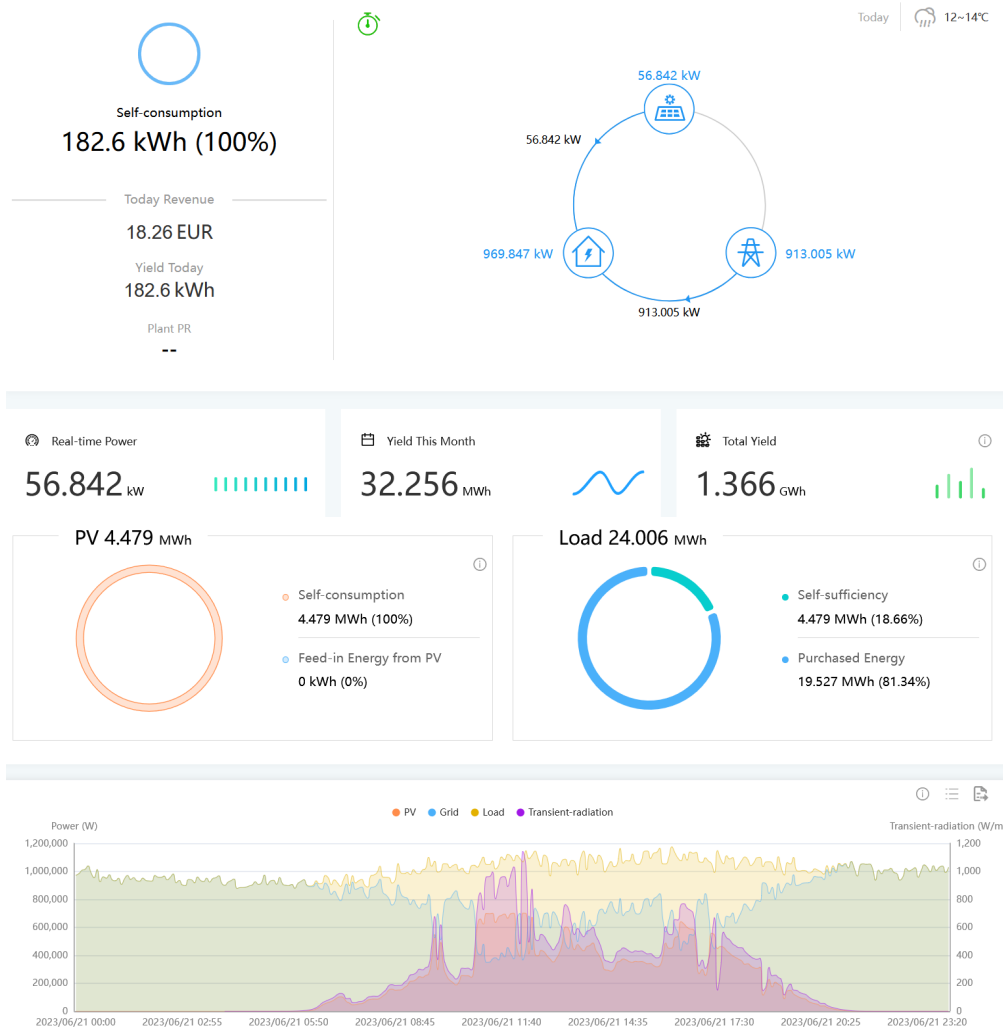


Figura 4.19: *Dashboard* do *software* do sistema fotovoltaico.

Adicionalmente, os dados dos dispositivos que suportam o sistema UPAC instalado, podem ser observados através da janela ilustrada na Figura 4.20, sendo descritos do seguinte modo:

- SG110CX - representa cada inversor utilizado na UPAC, sendo que se apresentam um total de sete instalados no sistema;

- Meteo Station2 - corresponde ao sensor de radiação solar instalado, de modo que o utilizador perceba como a produção de energia fotovoltaica é influenciada pela radiação incidente nos painéis instalados;
- UMG104 - caracteriza o equipamento que monitoriza a potência elétrica que é comprada à RESP.

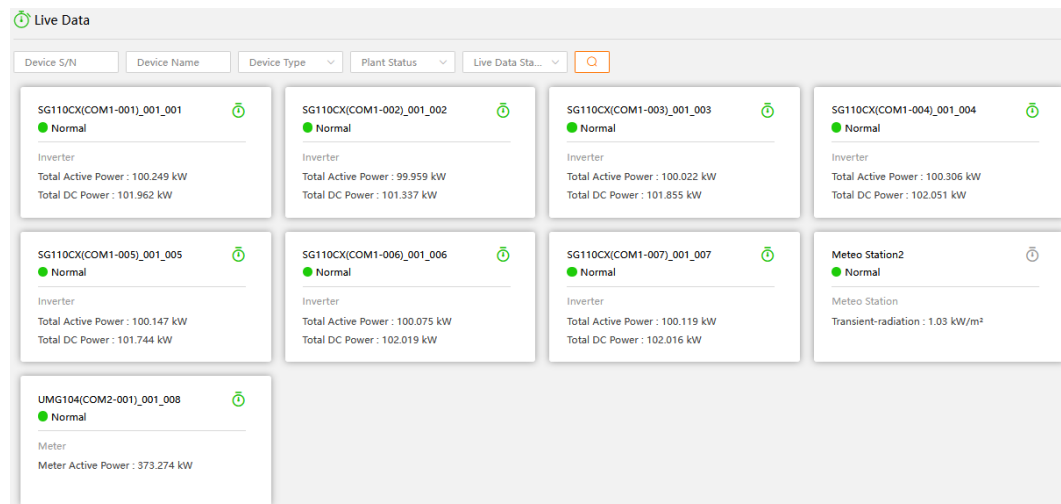


Figura 4.20: Dados em tempo real dos dispositivos.

Através dos dados obtidos a partir do *software* da central fotovoltaica, foi possível representar o gráfico ilustrado na Figura 4.21, que permite observar o consumo total de energia elétrica face à energia produzida pela UPAC instalada ao longo do período de um ano.

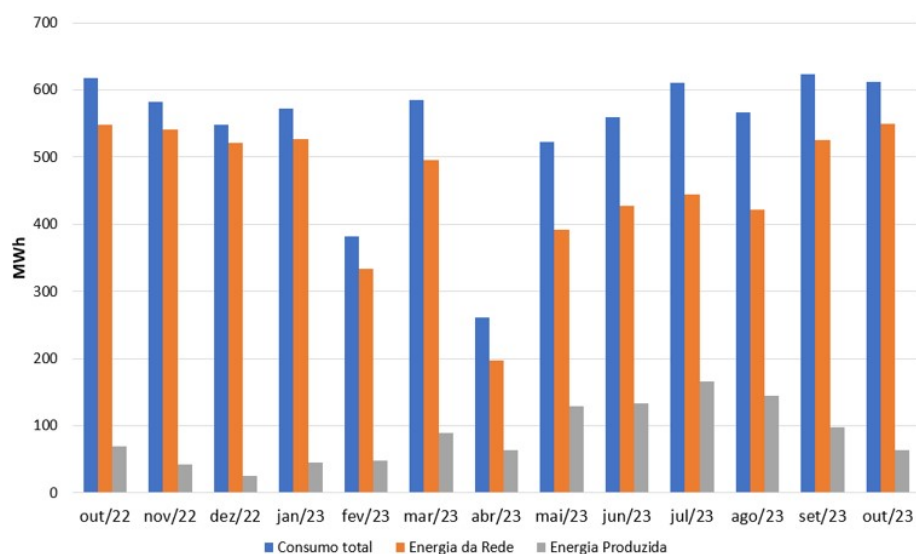


Figura 4.21: Consumo de energia elétrica face à produzida na UPAC.

Isto, permitiu inferir que a energia produzida durante esse período representa, em média, cerca de 16% do consumo total das instalações.

4.3.2 Rede de ar comprimido

O ar comprimido destaca-se por ser amplamente empregue na indústria, dado que é imprescindível para suprir os requisitos do processo, sendo necessário para o funcionamento de uma vasta quantidade de máquinas e equipamentos. Os sistemas de ar comprimido, no que diz respeito à sua produção, revelam-se um consumidor expressivo de energia elétrica, representando geralmente cerca de 10% do consumo total de energia elétrica das instalações. O presente caso de estudo apresenta um edifício dedicado à produção de ar comprimido para consumo próprio, sendo que o sistema implementado é semelhante ao exemplo da Figura 4.22 [4].

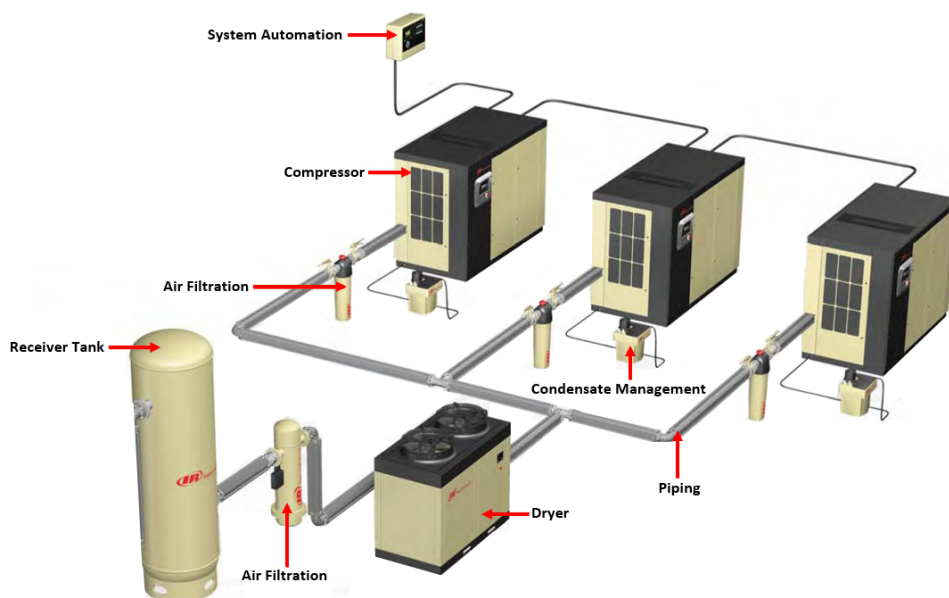


Figura 4.22: Exemplo de um sistema de produção de ar comprimido; adaptado de [101].

O sistema instalado no caso de estudo é composto pelos seguintes equipamentos:

- Quatro compressores de parafuso rotativo, representados na Figura 4.23 e caracterizados na Tabela 4.4, sendo que o compressor MH75 é utilizado exclusivamente em situações que requerem uma elevada quantidade de ar na rede;
- Dois depósitos de 4 m³ de volume;
- Um separador de óleos;
- Dois secadores;
- Dois filtros de ar;

- Um sistema de automação, responsável por controlar o funcionamento dos compressores de acordo com a necessidade de ar comprimido na rede, apresentando o perfil de cada um deles e destacando-os conforme a solução que ofereça a utilização mais eficiente da energia elétrica.



Figura 4.23: Compressores instalados no caso de estudo.

Tabela 4.4: Características dos compressores instalados.

	Compressor 1	Compressor 2	Compressor 3	Compressor 4
Fabricante	Ingersoll Rand	Ingersoll Rand	Ingersoll Rand	Ingersoll Rand
Modelo	R110n	MH75	R110ne	RSe160n
Pressão de trabalho (bar)	7,5 ± 0,1	7,2 ± 0,1	7,5 ± 0,1	7,5 ± 0,1
Potência (kW)	110	75	110	160
Fluxo máximo (m³/min)	21,9	11	23,4	31,9
Ano	2011	2014	2018	2022

Este sistema compreende duas redes de distribuição em tubagem de alumínio AIRnet ilustradas no Anexo A.2. Por um lado, encontra-se destacada a vermelha a rede geral de distribuição de ar comprimido, que procura satisfazer as necessidades de todos os equipamentos que necessitem de ar comprimido para o seu funcionamento. Por outro lado, está realçada a verde a rede dedicada à área SMT que advém da passagem do ar comprimido da rede geral por um circuito adicional de secagem, de modo que o ar comprimido solicitado nas máquinas *Pick and Place* das linhas

SMT se apresente o mais seco possível. Isto, prende-se no facto de se trabalhar com componentes elétricos e se procurar assegurar uma maior fiabilidade decorrente deste processo.

O maior consumo de ar comprimido dá-se ao nível das linhas SMT através da sua aplicação nas *Pick and Place*, onde o mesmo é utilizado para criar o vácuo que permite agarrar e colocar os componentes no PCB. Adicionalmente, o ar comprimido está presente em aplicações que apresentam um consumo relativamente baixo, como por exemplo, pistolas de limpeza, aparafusadoras, testes, máquinas, postos de trabalho, linhas de produção, armazém, laboratórios de desenvolvimento, entre outros.

As fugas de ar comprimido representam um desperdício de energia elevado, mesmo que inaudíveis. Como tal, é necessário efetuar periodicamente a sua identificação, quantificação e respetiva correção. Assim, foi realizado um relatório de fugas de ar comprimido no ano de 2023 por uma entidade habilitada, com auxílio de um equipamento ultrassónico que permitiu realizar uma estimativa com base na intensidade sonora, medida em decibéis, de cada fuga e, sucessivamente, quantificar o custo e poupança energética resultante das respetivas fugas. Considerando o período de funcionamento de 24 h/dia durante 365 dias/ano e um custo de energia elétrica de 0,11 €/kWh, o impacto das fugas identificadas está descrito na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Impacto das fugas identificadas.

Setor	Poupança Energética (kWh/ano)	Custo (€/ano)	Repartição (%)
Área SMT	120 782	13 286	86,1
Rede Geral - Piso técnico	4 637	510	3,3
Rede Geral - Seletiva V	3 945	434	2,8
Rede Geral - Lead free	3 721	409	2,6
Rede Geral - New evereste	2 969	327	2,1
Central ac	1 984	218	1,4
Rede Geral - Atlantis	1 537	169	1,1
Rede Geral - Laser marking	426	47	0,3
Oficina FCM	426	47	0,3
Total	140 427	15 447	100

4.3.3 Rede de azoto

O azoto, também denominado de nitrogénio, é um gás não inflamável presente no ar, constituindo cerca de 78% da atmosfera terrestre. Pode ser utilizado, praticamente, em qualquer setor para otimizar os rendimentos, os resultados e a vida útil de

materiais sensíveis ao ar, tais como alimentos, produtos farmacêuticos e eletrônicos [5].

A Air Liquide é a entidade responsável pelo fornecimento de azoto às instalações da Bosch de Ovar, assim como pela gestão do nível do depósito de armazenamento que apresenta uma capacidade de 26 316 litros, ilustrado na Figura 4.24 [102], [103].



Figura 4.24: Localização do depósito de azoto no parque industrial.

Esta empresa, filtra e purifica o azoto da atmosfera e fornece-o na forma líquida ou gasosa, consoante os requisitos da instituição que a contrata. O azoto líquido resulta da liquefação do azoto no estado gasoso, conferindo um ganho de espaço e, assim, facilita o seu transporte. Além das vantagens logísticas, apresenta também um acréscimo económico, na medida que o seu custo é significativamente mais baixo comparativamente ao estado gasoso. Devido à sua temperatura no estado líquido, que ronda os $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, o azoto demonstra ser altamente eficaz em aplicações de conservação criogénica [102], [103].

No que diz respeito à gestão do depósito, anteriormente mencionada, a Air Liquide apresenta um sistema de telemetria no depósito do caso de estudo, representado na Figura 4.25, que permite monitorizar o nível de azoto no mesmo.



Figura 4.25: Sistema de telemetria do nível de azoto no depósito.

Este emite um aviso quando o nível se encontra abaixo dos 30%, de modo a apurar quando deve ser abastecido o depósito de azoto.

Nas instalações do presente caso de estudo, o azoto é armazenado no depósito no estado líquido, seguindo para os permutadores adjacentes ao depósito que permitem realizar a vaporização do azoto. Dado isto, o azoto encontra-se sensivelmente à temperatura ambiente e é transportado no estado gasoso através de tubagens de cobre até ao coletor que se encontra na área de produção. A partir deste, o azoto é distribuído para os seus pontos de aplicação, onde é utilizado, maioritariamente no processo THT, para evitar a oxidação dos componentes durante a etapa de soldadura dos mesmos no PCB. Isto, é possível através da aplicação de azoto no invólucro das máquinas de soldadura por onda e nas seletivas, eliminando assim o oxigénio existente a fim de evitar a oxidação dos componentes. Atendendo ao seu elevado nível de pureza e ao papel determinante na qualidade, fiabilidade e desempenho dos dispositivos eletrónicos, o consumo deste recurso assume particular relevância, sobretudo em equipamentos que permanecem em funcionamento contínuo [103], [104].

4.4 Requisitos do Sistema

Ao longo deste tópico é realizado o enquadramento da instalação existente, destacando os recursos de monitorização atualmente disponíveis e o seu potencial de reaproveitamento. Posteriormente, são apresentados os requisitos iniciais, definidos com a finalidade de alcançar os objetivos estabelecidos no presente trabalho, bem como os requisitos posteriores, resultantes da necessidade de redefinir a estratégia adotada.

4.4.1 Estudo da instalação

A unidade fabril do caso de estudo dispõe de uma infraestrutura de comunicação previamente implementada, destinada à monitorização de consumos energéticos. Embora não se encontre documentada e tenha sido alvo de várias modificações ao longo do tempo, em consequência das alterações no *layout* da fábrica, esta infraestrutura interliga, ainda que de forma limitada, alguns equipamentos de medição. Assim, representa uma base relevante, suscetível de ser reaproveitada e integrada na nova solução de monitorização a implementar.

Considerando a quantidade significativa de pontos de medição instalados no caso de estudo – 62 relativos à energia elétrica e um ao ar comprimido – torna-se necessária a realização de um levantamento detalhado com o objetivo de recolher e validar toda a informação relevante. Este processo incidirá, essencialmente, sobre a identificação dos circuitos elétricos atualmente monitorizados, uma vez que, no caso do ar comprimido, existe apenas um ponto de medição instalado no coletor de saída da rede, responsável por monitorizar o consumo global do sistema de ar comprimido.

Importa referir que todos os equipamentos de monitorização instalados são compatíveis com o protocolo de comunicação Modbus, fator este de elevada relevância para a integração na nova solução. Relativamente aos equipamentos de energia elétrica, a sua maioria pertence às marcas Circutor e Schneider Electric, enquanto o equipamento destinado à monitorização do ar comprimido é da marca Ingersoll Rand.

4.4.2 Requisitos iniciais

No âmbito da solução inicialmente prevista, foi definido um conjunto de requisitos que representam as condições funcionais e técnicas necessárias para garantir a conceção e implementação do sistema de monitorização. Para maior clareza, estes requisitos são agrupados em duas categorias, que se apresentam descritas de seguida.

Requisitos relativos à infraestrutura física

- Realização de um levantamento detalhado dos equipamentos de monitorização e da rede de comunicação existentes, de modo a assegurar a sua integração na solução a implementar;
- Instalação e definição de 12 novos pontos de medição de energia elétrica, um de ar comprimido e sete de azoto;
- Garantia de compatibilidade entre os novos equipamentos, os equipamentos previamente instalados e a plataforma de energia prevista;
- Seleção dos equipamentos e materiais necessários para a execução do projeto;

- Definição e planeamento da rede de comunicação capaz de suportar todos os equipamentos de monitorização;
- Elaboração de um caderno de encargos para a execução das atividades e para a obtenção de um orçamento ajustado à realidade do projeto;
- Cumprimento da condição de que o custo do projeto não ultrapasse o valor definido no plano de orçamento da empresa para 2024 (confidencial);
- Parametrização dos equipamentos de monitorização.

Requisitos relativos à plataforma e funcionalidades

- Implementação da plataforma de energia da Bosch como solução central de monitorização;
- Monitorização de parâmetros elétricos, como potência ativa e reativa, corrente, tensão, frequência, fator de potência e distorção harmónica, e de parâmetros do ar comprimido e azoto, como caudal e consumo acumulado;
- Supervisão em tempo real dos parâmetros monitorizados;
- Acesso a dados históricos com possibilidade de filtragem por período de tempo e ponto de medição;
- Disponibilização de relatórios personalizados e exportáveis de indicadores de desempenho energético;
- Configuração de alarmes e alertas automáticos via *e-mail* para deteção de anomalias.

4.4.3 Requisitos posteriores

Na sequência da comunicação, por parte da Bosch, do processo de venda da unidade de negócio de Building Technologies, onde se inclui a fábrica de Ovar – doravante designado por processo de *carve-out* – tornou-se necessária a redefinição dos requisitos inicialmente estabelecidos. Posto isto, deixou de existir o vínculo à utilização da plataforma de energia da Bosch, tendo-se optado pela atualização da plataforma PowerStudio, instalada na fábrica na sua versão *standard*. Assim, foram acrescentados os seguintes requisitos do sistema:

- Migração do *software* PowerStudio da Circutor, atualmente implementado na fábrica, para a versão Deluxe. Esta permite a integração de equipamentos de diferentes fabricantes através do protocolo Modbus, bem como a monitorização de um maior número de pontos de medição;

- Atualização do sistema operativo do servidor responsável pela execução da plataforma de monitorização;
- Aquisição de novos equipamentos compatíveis com o protocolo de comunicação Modbus, para a monitorização dos novos pontos de medição;
- Configuração do PowerStudio Deluxe para integração de todos os equipamentos de monitorização, incluindo os novos pontos a instalar;
- Desenvolvimento de ecrãs de supervisão personalizados e de relatórios configuráveis, de acordo com as necessidades da organização.

4.5 Proposta de Solução

A proposta de solução visa dar resposta aos requisitos previamente definidos, garantindo uma abordagem estruturada, escalável e devidamente adaptada ao contexto industrial do caso de estudo. Para uma implementação eficaz do sistema de monitorização proposto, é essencial, em primeiro lugar, compreender a configuração atualmente existente na instalação, representada na Figura 4.26.

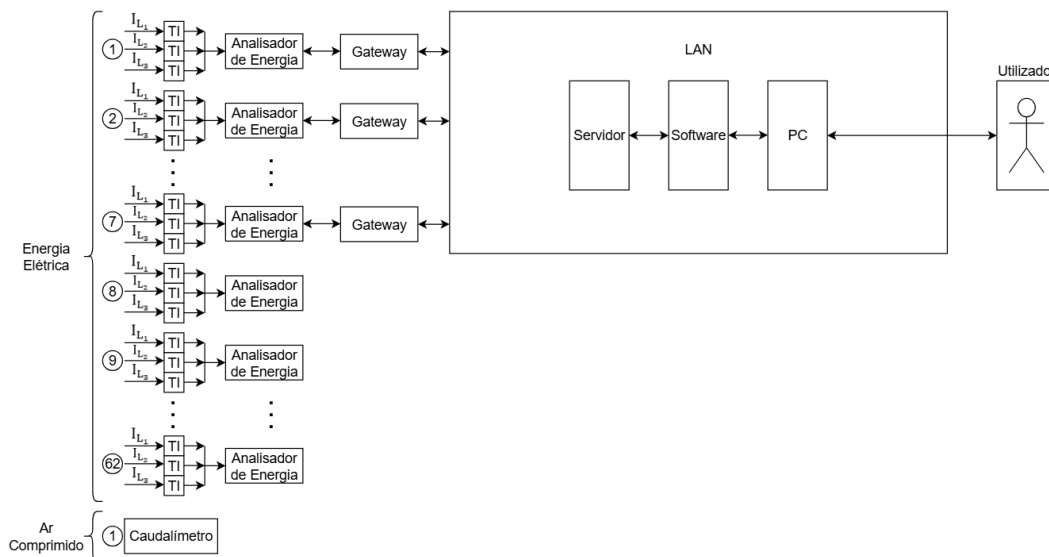


Figura 4.26: Solução existente no caso de estudo.

A configuração atual apresenta limitações significativas, sendo que apenas sete dos 63 equipamentos de medição instalados se encontram integrados na rede de comunicação e efetivamente monitorizados no *software* de visualização. Isto, compromete fortemente a capacidade de análise e controlo dos consumos da instalação, não tirando pleno proveito do investimento realizado na aquisição e instalação dos equipamentos.

Assim, a solução proposta, ilustrada na Figura 4.27, visa colmatar as limitações identificadas, através da reestruturação da infraestrutura de comunicação.

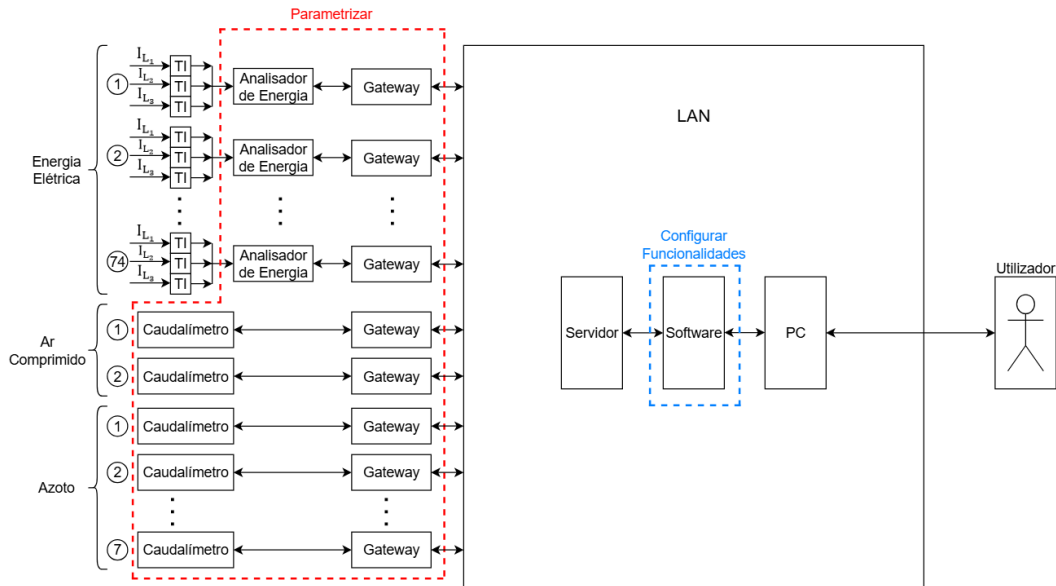


Figura 4.27: Solução proposta para a implementação do projeto.

Esta nova metodologia tem como objetivo garantir que todos os equipamentos já instalados, bem como os que venham a ser implementados no âmbito do presente projeto, sejam devidamente monitorizados através da plataforma de gestão de energia.

De modo a assegurar a correta medição e transmissão dos dados para o sistema de monitorização, será necessário realizar a parametrização de todos os equipamentos destacados a vermelho na figura anterior. Esta parametrização deve considerar a configuração da comunicação, a identificação dos dispositivos na rede e as características técnicas dos circuitos a monitorizar.

Relativamente à visualização dos dados recolhidos, será fundamental configurar adequadamente as funcionalidades do *software* a implementar, conforme apresentado na Figura 4.28.

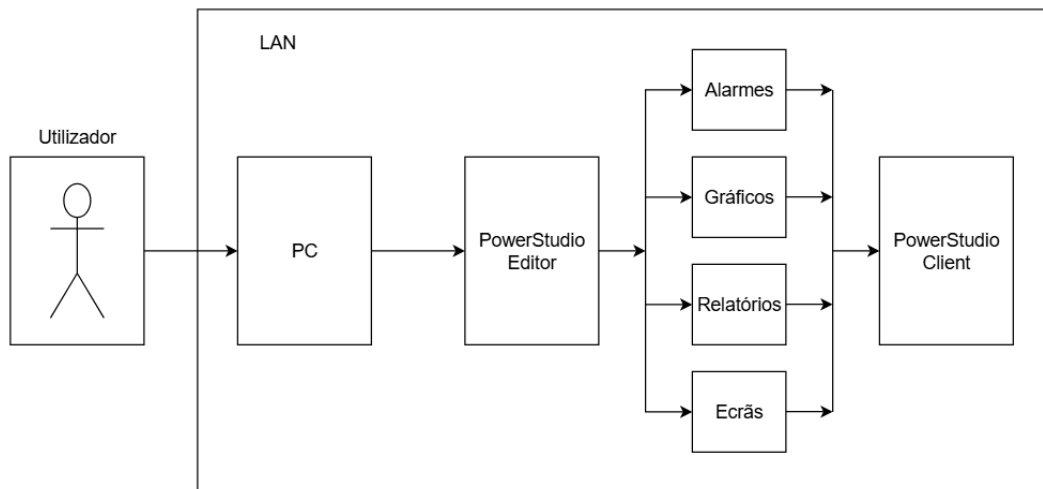


Figura 4.28: Configuração das funcionalidades do *software*.

Esta ação visa responder de forma eficaz às necessidades identificadas no contexto do caso de estudo. Entre as funcionalidades previstas destacam-se a criação de alertas configuráveis, a elaboração de relatórios periódicos, a personalização de ecrãs e a representação gráfica dos valores medidos.

Esta abordagem permitirá alcançar uma monitorização mais completa e precisa, aumentando a capacidade de deteção de anomalias, a otimização dos processos operacionais e o suporte à tomada de decisões estratégicas. Posto isto, espera-se uma melhoria significativa ao nível da eficiência energética da instalação analisada.

Capítulo 5

Implementação do Projeto

O presente capítulo apresenta a implementação do sistema de monitorização desenvolvido para o caso de estudo, detalhando os componentes de *hardware* e *software* responsáveis pela aquisição, processamento e visualização dos dados. A abordagem adotada teve como princípio garantir a fiabilidade, escalabilidade e integração no ambiente fabril, assegurando que o sistema responde de forma eficiente às necessidades da monitorização dos recursos e aos objetivos do projeto.

5.1 Hardware do Sistema Implementado

O presente projeto foi inicialmente concebido para a implementação e monitorização de novos pontos de medição: 12 circuitos de energia elétrica, um de ar comprimido e sete de azoto. No entanto, a análise orçamental revelou que o custo de implementação excedia significativamente o limite estabelecido no plano de orçamento da empresa para 2024, no âmbito da eficiência energética. Posto isto, optou-se por uma abordagem faseada, priorizando, numa primeira fase, a monitorização dos circuitos de energia elétrica. A aquisição e instalação dos equipamentos de medição para os pontos de ar comprimido e azoto foram adiadas para uma fase posterior, em conformidade com o próximo plano orçamental do projeto.

Ao longo deste tópico, será apresentada a arquitetura do sistema adotada para a implementação do projeto, com uma descrição detalhada dos principais componentes e da sua integração. Seguidamente, será apresentada a justificação da solução

adotada, explicando os motivos que levaram à escolha dos equipamentos e tecnologias utilizadas. Posteriormente, serão representados os pontos monitorizados, de acordo com os requisitos estabelecidos, assim como o planeamento dos barramentos de comunicação necessários para estabelecer a rede do sistema. De seguida, será abordada a parametrização dos equipamentos, com o objetivo de garantir a correta comunicação entre os dispositivos e a precisão no cálculo dos valores monitorizados. Por fim, será detalhada a execução das atividades planeadas, incluindo a definição dos trabalhos e o material utilizado.

5.1.1 Arquitetura do sistema

De modo a garantir o correto funcionamento do sistema de monitorização de recursos e atingir os objetivos delineados, estabeleceu-se a arquitetura do sistema representada na Figura 5.1.

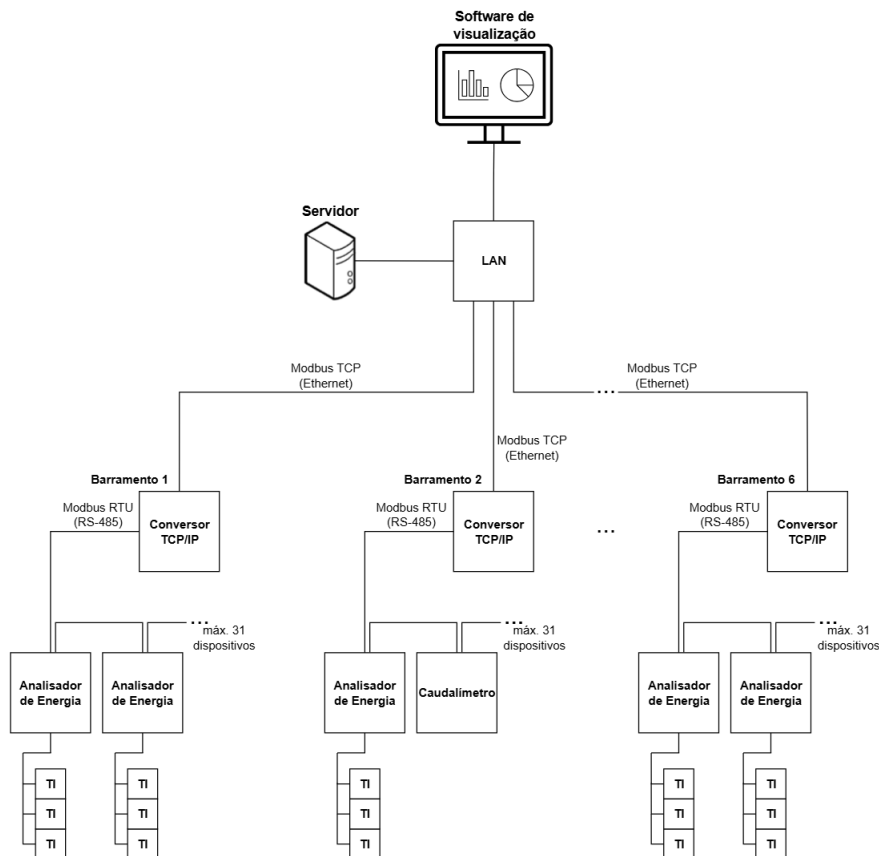


Figura 5.1: Arquitetura do sistema.

Efetivamente, esta contempla uma vasta gama de equipamentos que permitem a medição dos parâmetros dos recursos requeridos no projeto, tais como a energia elétrica, ar comprimido e azoto. Além disto, foi necessária a integração destes na rede de comunicação que suporta a transmissão dos dados para o dispositivo responsável

pela gestão dos mesmos sendo, neste caso, um servidor. Por fim, apresenta um *software* que faculta a visualização dos dados medidos no sistema, conferindo uma série de ferramentas de análise ao utilizador.

No que diz respeito à rede de comunicação responsável pela transmissão dos dados entre os dispositivos de campo e o servidor, definiu-se o uso do protocolo de comunicação Modbus, amplamente utilizado a nível industrial. Isto, tornou-se exequível devido à utilização de um conversor TCP/IP (i.e. *gateway*) que se revelou um elemento fulcral na rede de comunicação, dado que é este que interpreta os pedidos do servidor e os encaminha para os dispositivos de medição. A comunicação pode, assim, ser segmentada em duas partes, as quais são detalhadamente descritas de seguida.

Comunicação servidor - conversor

O servidor realiza os pedidos através da LAN implementada no parque industrial. O conversor, por sua vez, estabelece conexão com o servidor, ligando-se ao bastidor de rede mais próximo através do meio físico Ethernet, tendo em conta que o cabo Ethernet apresenta um limite de extensão de 100 m. Assim, a comunicação entre estes dois equipamentos dá-se através do protocolo Modbus TCP, que resulta da implementação do protocolo Modbus com a interface Ethernet TCP/IP. Isto, permite que a transmissão de dados da mensagem Modbus entre dispositivos compatíveis seja realizada de forma segura e sem erros, utilizando a porta 502, especificamente destacada para comunicações Modbus. Efetivamente, o Modbus TCP baseia-se na configuração *client/server*, sendo que, no contexto deste projeto, o *client* corresponde ao servidor responsável pela gestão dos dados do sistema de monitorização, enquanto o *server* diz respeito ao conversor. Adicionalmente, é importante referir que é possível coexistir múltiplos *clients* e *servers* na arquitetura de comunicação, pelo que neste projeto foram implementados vários conversores (i.e. *servers*).

Comunicação conversor - dispositivos de medição

O conversor e os dispositivos de medição estão interligados através do meio físico RS-485, comunicando-se através do protocolo de comunicação série Modbus RTU. Este estabelece um barramento com topologia *master/slave*, no qual existe um único *master*, correspondente ao conversor, que pode comunicar com até 31 dispositivos de medição, designados como *slave*, permitindo um comprimento máximo de 1 200 m. Todos os dispositivos que integram um mesmo conversor ou *gateway*, foram configurados de forma homogénea no que diz respeito ao modo de transmissão e aos parâmetros de comunicação, nomeadamente a taxa de transmissão (i.e. *baud rate*), a paridade e o número de *bits* de dados, entre outros. De outra forma, poderão ocorrer falhas na comunicação, comprometendo a integridade dos dados e originando a sua possível corrupção ou perda.

5.1.2 Justificação da solução adotada

A maioria dos equipamentos de medição atualmente instalados no caso de estudo pertencem à marca Circutor, sendo compatíveis com a comunicação série RS-485 através do protocolo Modbus. Estes dispositivos permitem a leitura de diversos parâmetros elétricos relevantes, satisfazendo assim os requisitos do sistema. Com base na análise realizada no âmbito deste trabalho, verificou-se que estes equipamentos demonstram elevada fiabilidade na medição dos valores elétricos, apresentando simultaneamente uma relação custo-benefício favorável. Tendo em conta estes fatores, considerou-se adequado que os novos equipamentos adquiridos para a expansão da monitorização de energia elétrica fossem igualmente da mesma marca. A seleção dos modelos específicos foi realizada de acordo com as características dos circuitos a monitorizar e no espaço disponível para a sua instalação.

Adicionalmente, é importante referir que a plataforma de energia implementada apenas suporta a comunicação através do protocolo Modbus. Dado que os equipamentos instalados e os que foram selecionados para a implementação apresentam suporte ao protocolo Modbus, não se verificou qualquer constrangimento em termos de integração. No entanto, caso tivessem sido identificados equipamentos sem comunicação por Modbus, teria sido necessária a utilização de uma *gateway* apropriada para converter os dados para o protocolo Modbus, assegurando a compatibilidade com a plataforma de monitorização e a infraestrutura de comunicação existente.

Relativamente à monitorização dos consumos de ar comprimido e azoto, foi necessário realizar um estudo do mercado com o objetivo de identificar os equipamentos mais adequados. A seleção teve em consideração as características dos circuitos, os valores a monitorizar e os requisitos de integração com a plataforma de monitorização.

A comunicação entre os diversos dispositivos de medição é assegurada através de cablagem série RS-485, uma escolha justificada pela sua robustez e fiabilidade em contexto industrial. Este tipo de ligação permite interligar múltiplos equipamentos num único barramento, suportando distâncias até 1 200 m e apresentando boa resistência a interferências eletromagnéticas. Estas características tornam esta solução particularmente relevante para instalações industriais, onde existe elevada presença de ruído eletromagnético.

5.1.3 Representação dos pontos monitorizados

Para garantir uma análise eficaz e completa do sistema de monitorização de recursos no caso de estudo, o cenário ideal consistiria na instalação de equipamentos de medição em todos os circuitos das instalações. No entanto, tal abordagem revela-se economicamente inviável, devido ao elevado investimento necessário. Assim, tendo em conta o número de novos pontos a monitorizar de cada recurso no âmbito do

presente projeto, tornou-se fundamental a definição dos pontos de maior interesse para o processo, garantindo, ao mesmo tempo, um equilíbrio entre o custo e a eficácia da monitorização. Posto isto, a seleção dos pontos a monitorizar foi realizada com base nos seguintes critérios:

1. Descentralizar o consumo total - permite uma visão geral do consumo dos recursos, identificando as áreas com maior impacto;
2. Áreas de maior consumo - faculta a identificação dos setores ou departamentos que apresentam maior utilização dos recursos, com vista na procura de oportunidades de otimização;
3. Equipamentos de maior consumo - possibilita a avaliação da estabilidade operacional e eficiência, bem como de consumos atípicos que podem indicar possíveis problemas técnicos ou operacionais.

De acordo com os critérios acima mencionados, apresentam-se, de seguida, os pontos implementados nos sistemas de energia elétrica, ar comprimido e azoto.

Energia elétrica

No que diz respeito à energia elétrica, o caso de estudo apresentava diversos analisadores de energia instalados. Assim, a primeira etapa consistiu no levantamento detalhado dos equipamentos disponíveis e dos circuitos monitorizados, o que permitiu identificar dispositivos passíveis de desinstalação e reaproveitamento em novos pontos de medição. Esta análise encontra-se sintetizada na Tabela 5.1, que apresenta as características técnicas dos equipamentos a aproveitar.

Tabela 5.1: Características técnicas dos equipamentos a reaproveitar.

Analisador	TI	Corrente Nominal (A)	Diâmetro Interior (mm)
CVM NET 4 MC	MC1-55-500/1000/1500 A	1500	55
CVM NET 4 MC	MC1-55-500/1000/1500 A	1500	55
CVM NET 4 MC	MC1-30-250/400/500 A	500	30
CVM NET 4 MC	MC1-30-250/400/500 A	500	30
CVM MINI ITF	TD8 600/5 A	600	43
PM5110	Schneider 400/5 A	400	35
PM5110	Schneider 75/5 A	75	21
PM5110	Schneider 75/5 A	75	21
CVM NET MC	MC1-20-150/200/250 A	250	20

A identificação dos equipamentos a reutilizar resultou, em primeiro lugar, da redundância de medição em determinados circuitos, resultante da instalação de um

novo QGBT. Este veio equipado com dispositivos da Schneider Electric, que monitorizam alguns dos circuitos previamente abrangidos pelos analisadores existentes. Adicionalmente, foram identificados equipamentos associados a circuitos que já não apresentam cargas ativas, tornando-os obsoletos no contexto atual.

Com base nas características operacionais dos equipamentos apresentados na tabela anterior, foram definidos os circuitos monitorizados pelos mesmos. A seleção destes pontos teve em conta os critérios suprarreferidos e os seguintes fatores técnicos: a corrente de proteção do circuito, o diâmetro das cablagens de alimentação e o espaço disponível para a instalação dos equipamentos e respetivas ligações. Posto isto, a Tabela 5.2 demonstra a definição dos circuitos selecionados para a implementação dos equipamentos a reaproveitar, considerando as características técnicas de cada circuito.

Tabela 5.2: Circuitos definidos para a implementação dos equipamentos a reaproveitar.

Circuito	Corrente da Proteção (A)	Diâmetro Cablagem (mm)	Analisador	TI
QG.Ovr103.01.01	250	30	CVM NET 4 MC	MC1-55-500/1000/1500 A
QG.Ovr104.01.01	400	35	CVM NET 4 MC	MC1-55-500/1000/1500 A
QG.Ovr108.00.05	250	11	CVM NET 4 MC	MC1-30-250/400/500 A
QG.Ovr106.00.03	100	10	CVM NET 4 MC	MC1-30-250/400/500 A
QG.Ovr103.00.01	600	35	CVM MINI ITF	TD8 600/5 A
Compressor R110ne	250	30	PM5110	Schneider 400/5 A
QP.Ovr102.00.10	40	6	PM5110	Schneider 75/5 A
QP.Ovr117.00.01	32	8	PM5110	Schneider 75/5 A
QP.Ovr102.00.07	125	10	CVM NET MC	MC1-20-150/200/250 A

O correto dimensionamento dos TI é um fator crucial para garantir medições precisas e o funcionamento seguro dos equipamentos. Assim, os pontos de medição designados encontram-se em conformidade com as características técnicas dos equipamentos a reaproveitar, garantindo simultaneamente a otimização dos recursos disponíveis. Adicionalmente, no âmbito do planeamento do presente projeto, definiu-se 12 novos pontos de monitorização de energia elétrica. A seleção e aquisição dos novos analisadores de energia e respetivos TI para estes circuitos seguiram o mesmo padrão de critérios aplicados aos equipamentos acima referidos. Deste modo, na Tabela 5.3 encontram-se representados os novos circuitos a monitorizar, bem como as respetivas características técnicas e os equipamentos associados.

Tabela 5.3: Definição dos novos pontos de monitorização.

Circuito	Corrente da Proteção (A)	Diâmetro Cablagem (mm)	Analizador	TI
QP.Ovr101.01.03	160	7	CVM E3 MINI ITF	TD4 200/5 A
QP.Ovr101.01.01	160	13	CVM E3 MINI ITF	TD4 200/5 A
QP.Ovr101.00.05	100	8	CVM E3 MINI ITF	TC4 100/5 A
SMT2 (N)	100	8	CVM E3 MINI ITF	TC4 100/5 A
SMT2 (E)	63	6	CVM E3 MINI ITF	TC4 60/5 A
QP.Ovr102.00.03	63	7	CVM E3 MINI ITF	TC4 75/5 A
QP.Ovr102.00.12	250	12	CVM E3 MINI MC	MC1-30-250/400/500 A
QP.Ovr109.00.03	100	9	CVM E3 MINI ITF	TC4 100/5 A
QP.Ovr108.00.06	160	10	CVM NET ITF	TD4 200/5 A
QP.Ovr108.00.09	100	10	CVM E3 MINI MC	MC3-125 A
QP.Ovr108.00.03	80	10	CVM E3 MINI MC	MC3-125 A
QP.Ovr108.00.04	160	15	CVM E3 MINI ITF	TD4 200/5 A

A implementação dos circuitos apresentados nas tabelas anteriores tiveram como principal objetivo a descentralização do consumo total, possibilitando a identificação das áreas de maior consumo energético. Esta abordagem permitiu otimizar a gestão dos recursos, promovendo uma análise detalhada e eficiente do consumo, com vista à identificação de oportunidades de melhoria operacional e aumento da eficiência energética.

Ar comprimido

Atualmente, o caso de estudo dispõe de um caudalímetro da Ingersoll Rand instalado na rede geral de ar comprimido. Este dispositivo permite medir o caudal instantâneo, o consumo total, a temperatura e a pressão do sistema, dispondo da opção de comunicação por Modbus RTU. De modo a maximizar a sua utilização e identificar eventuais desperdícios, definiu-se a instalação de um equipamento de monitorização num circuito com um perfil de consumo significativo.

Após a análise da infraestrutura da rede de ar comprimido, verificou-se que a área de produção SMT representa a maior parcela do consumo deste recurso, sobretudo devido ao funcionamento das máquinas *Pick and Place*. Estas utilizam ar comprimido para gerar vácuo, permitindo a manipulação e o posicionamento dos componentes nos PCB. Assim, este circuito foi o selecionado para a implementação do equipamento de monitorização. Na Tabela 5.4 encontram-se representadas as características da tubagem no ponto de instalação do dispositivo, bem como a pressão máxima operacional do ar comprimido.

Tabela 5.4: Características do circuito a monitorizar de ar comprimido.

Circuito	Diâmetro da Tubagem (mm)	Material da Tubagem	Pressão Máxima (bar)
Área SMT	100	Alumínio	16

Para garantir medições precisas, é necessário selecionar um caudalímetro adequado, considerando as especificações do circuito apresentado na tabela anterior e a compatibilidade com a infraestrutura de comunicação do sistema. Para tal, realizou-se um estudo do mercado e foram solicitadas propostas a empresas especializadas para a implementação de uma solução compatível com o circuito referido. Deste modo, a Tabela 5.5 ilustra os modelos de caudalímetros das empresas que responderam à solicitação, bem como as características de medição, comunicação e o tipo de instalação dos equipamentos.

Tabela 5.5: Modelos de caudalímetros propostos para o circuito de ar comprimido.

Empresa	Modelo do Equipamento	Valores Medidos	Comunicações	Tipo de Instalação
IFM	SDG550	Caudal, Totalizador, Pressão, Temperatura	Sinal de comutação; Sinal analógico; Sinal de pulso; IO-Link	Flange
CS Instruments	VA 500	Caudal, Totalizador, Pressão (Opcional)	Modbus RTU; Sinal de pulso; Sinal analógico	Inserção
CDI Meters	5400-101M	Caudal, Pressão (Opcional)	Modbus RTU; Sinal de pulso	Inserção

Nesta fase do projeto, não foi adquirido nem implementado o equipamento de monitorização de ar comprimido. No entanto, após análise das propostas, definiu-se que o modelo VA 500 da CS Instruments seria a solução ideal para uma futura implementação no circuito de ar comprimido. Este modelo, juntamente com o caudalímetro da CDI Meters, destaca-se como uma das opções mais economicamente viáveis. Ambos são compatíveis com a infraestrutura de comunicação do sistema de monitorização, uma vez que suportam a comunicação por Modbus. Porém, priorizou-se o VA 500 em detrimento do modelo da CDI Meters devido à sua capacidade de medir o consumo total, garantindo assim uma monitorização mais abrangente e eficiente.

Azoto

Considerando a infraestrutura existente e os principais consumidores de azoto, definiu-se a instalação de caudalímetros em sete pontos estratégicos da rede: um à saída da rede e seis em máquinas que utilizam o recurso para eliminar o oxigénio presente na área de soldadura. A Tabela 5.6 apresenta a distribuição dos pontos de monitorização, as características das tubagens nos locais de instalação dos equipamentos e a respetiva pressão máxima operacional do azoto.

Tabela 5.6: Características dos circuitos a monitorizar de azoto.

Circuito	Diâmetro da Tubagem (mm)	Material da Tubagem	Pressão Máxima (bar)
Rede Geral	25	Cobre	16
Seletiva I	15	Cobre	8
Seletiva III	15	Cobre	8
Seletiva V	15	Cobre	8
Delta Wave	15	Cobre	8
THT2	15	Cobre	8
THT3	15	Cobre	8

Através da análise da tabela, é possível distinguir dois grupos: a rede geral, com tubagem de 25 mm de diâmetro, e os circuitos das máquinas, com tubagem de 15 mm. Posto isto, seguindo o mesmo princípio aplicado ao ar comprimido, realizou-se uma consulta ao mercado e abordou-se algumas empresas especializadas na área, de modo a identificar os caudalímetros mais adequados às características dos circuitos. Como resultado, encontram-se ilustradas na Tabela 5.7 as soluções propostas para cada grupo, bem como as características dos equipamentos.

Tabela 5.7: Modelos de caudalímetros propostos para os circuitos de azoto.

Grupo	Empresa	Modelo do Equipamento	Valores Medidos	Comunicações	Tipo de Instalação
Rede Geral	IFM	SD8600	Caudal, Totalizador, Pressão, Temperatura	Sinal de comutação; Sinal analógico; Sinal de pulso; IO-Link	Inserção
	CS Instruments	VA 525	Caudal, Totalizador, Pressão (Opcional)	Modbus RTU; Sinal de pulso; Sinal analógico	Inserção
	CDI Meters	5200-10C	Caudal, Pressão (Opcional)	Modbus RTU; Sinal de pulso	Inserção
Máquinas	IFM	SD6600	Caudal, Totalizador, Pressão, Temperatura	Sinal de comutação; Sinal analógico; Sinal de pulso; IO-Link	Inserção
	CS Instruments	VA 525	Caudal, Totalizador, Pressão (Opcional)	Modbus RTU; Sinal de pulso; Sinal analógico	Inserção

Nesta fase do projeto, à imagem do ar comprimido, os equipamentos de monitorização de azoto não serão implementados. No entanto, após a análise das soluções apresentadas, estabeleceu-se que os modelos da CS Instruments seriam a opção ideal para futura instalação, tanto na rede geral como nos circuitos das máquinas, devido às vantagens anteriormente destacadas para o circuito de ar comprimido.

5.1.4 Barramentos de comunicação

Com base na arquitetura do sistema delineada anteriormente e nos equipamentos instalados, o planeamento dos barramentos da rede Modbus RTU tornou-se essencial

para estabelecer um sistema de comunicação estruturado e fidedigno. Este viabiliza, entre outras, as seguintes vantagens:

- Leitura dos dados - assegura a leitura adequada dos dados pretendidos de cada equipamento;
- Escalabilidade - possibilita a adição de novos equipamentos ao sistema sem a necessidade de grandes modificações na infraestrutura existente;
- Redução da latência - permite uma resposta mais rápida e eficiente dos dispositivos, sendo crucial em sistemas que requerem a transmissão de vários dados em tempo real;
- Minimização de custos - proporciona a otimização da instalação das cablagens, o que contribui para a redução dos custos, uma vez que o cabo de comunicação necessário é um insumo de alto custo;
- Identificação e correção de falhas - faculta a rápida identificação de falhas e a sua respetiva correção, minimizando o tempo de inatividade e aumentando a eficiência operacional.

Dito isto, realizou-se o planeamento dos barramentos que suportam a comunicação Modbus RTU, que utiliza o padrão RS-485 como camada física para a comunicação em série. De modo a garantir a eficácia do sistema, estes foram definidos com base em alguns parâmetros teóricos do padrão RS-485. Teoricamente, cada barramento pode suportar até 32 equipamentos, dos quais um atua como *master* e os restantes 31 como *slaves*, com um comprimento máximo de 1 200 m para a rede de comunicação. No entanto, para assegurar uma comunicação confiável e robusta na prática, estabeleceu-se um limite inferior ao teórico para o número de equipamentos e o comprimento do barramento. Esta abordagem mais conservadora visa minimizar potenciais problemas de comunicação, como atenuações de sinal ou interferências eletromagnéticas, especialmente em instalações mais complexas. Assim, dado o número de equipamentos de medição instalados no caso de estudo, definiu-se seis barramentos que se encontram ilustrados no Anexo B. A distribuição dos equipamentos pelos barramentos foi cuidadosamente planeada, tendo em conta as respetivas localizações, de modo a garantir a melhor configuração possível, pelo que as suas características se encontram demonstradas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Características dos barramentos de comunicação.

Barramento	Comprimento Total (m)	Número de Dispositivos
1	30	21
2	65	6
3	300	22
4	220	15
5	175	8
6	2	3

Os comprimentos apresentados na tabela foram calculados teoricamente com base no ficheiro *Computer-Aided Design* (CAD) do *layout* do parque industrial.

5.1.5 Parametrização dos equipamentos

Dado o planeamento e a definição dos barramentos de comunicação, tornou-se essencial proceder à correta parametrização dos equipamentos. Esta etapa desempenha um papel fundamental na garantia da integridade e precisão dos dados recebidos e transmitidos pelos dispositivos, especialmente em sistemas que exigem monitorização contínua. Para tal, estabeleceu-se que todos os equipamentos que compõem os barramentos de comunicação da rede Modbus RTU devem apresentar os seguintes parâmetros: 19 200 de *baud rate*, 8 *bits* de dados, 1 *bit* de paragem, sem paridade e comunicação Modbus. Dado isto, foi necessário assegurar que esses parâmetros eram comuns a todos os equipamentos do barramento, assim como a identificação dos periféricos de acordo com o delineado. Adicionalmente, é imprescindível que os dados dos dispositivos de medição utilizados para o cálculo das variáveis monitorizadas sejam corretamente definidos. De seguida, será apresentada a parametrização detalhada dos equipamentos que suportam a comunicação Modbus, incluindo os equipamentos de medição, como os analisadores de energia e o caudalímetro, bem como dos conversores TCP/IP.

Analisador de energia

A correta parametrização dos analisadores de energia é um passo crucial para garantir a precisão das medições e a integridade dos dados obtidos. Um aspeto particularmente importante neste processo é a correta definição da relação de transformação dos TI instalados no circuito a medir. Para tal, é essencial ter em conta os valores da corrente primária e secundária dos TI, uma vez que estes exercem influência direta no cálculo das variáveis monitorizadas, tais como a potência ativa, energia consumida, distorção harmónica, entre outras. Na Figura 5.2 são apresentados exclusivamente os ecrãs de parametrização da relação de transformação dos

analísadores de energia, que permitem a definição dos valores da corrente primária e secundária.



(a) Primário TI (b) Secundário TI

Figura 5.2: Parametrização da relação de transformação dos analisadores de energia.

No caso do modelo CVM E3 MINI ITF, o valor da corrente secundária dos TI está, por padrão, definido como 5 A, embora também seja possível configurar para 1 A. Adicionalmente, é fundamental ajustar os parâmetros de comunicação dos analisadores de energia de acordo com os valores especificados acima, conforme ilustram os ecrãs apresentados na Figura 5.3.



(a) Protocolo (b) Baud rate (c) Periférico

Figura 5.3: Parametrização da comunicação da rede Modbus dos analisadores de energia.

Deve-se garantir que a velocidade de comunicação esteja definida para 19 200 *Bits Per Second* (bps) e que o número de periférico do equipamento corresponda ao planeamento dos barramentos de comunicação. Este ajuste é essencial para assegurar a compatibilidade entre os equipamentos da rede de comunicação e permitir a correta monitorização dos valores dos dispositivos. A figura acima apenas ilustra os ecrãs relativos à definição do protocolo, *baud rate* e número de periférico do equipamento. Contudo, é imprescindível configurar também outros parâmetros, tais como *stop*

bits, *data bits* e paridade, de modo a assegurar o correto funcionamento da rede. Embora a maioria desses parâmetros venha pré-configurada de acordo com o pretendido, recomenda-se a verificação de todas as definições e a realização dos ajustes necessários.

No presente caso de estudo, instalou-se diversos modelos de analisadores de energia. A parametrização dos diferentes equipamentos obedece aos mesmos princípios, sendo que a única diferença reside no acesso e manuseamento do menu de configurações, que pode variar de acordo com o modelo e/ou a marca do equipamento. Os passos detalhados para a configuração dos parâmetros necessários do analisador de energia encontram-se descritos no Anexo C.1.

Caudalímetro

A configuração do caudalímetro instalado na rede de ar comprimido do caso de estudo, segue um processo semelhante ao dos analisadores de energia, no que diz respeito aos parâmetros de comunicação e à identificação do número de periférico planeado no barramento. Contudo, em vez de se ajustar a relação de transformação dos TI, o caudalímetro requer a correta definição do diâmetro interno da tubagem onde se encontra instalado, conforme se encontra apresentado na Figura 5.4.



Figura 5.4: Parametrização do valor do diâmetro interno da tubagem do caudalímetro.

A correta parametrização do valor referido é determinante para o cálculo das variáveis monitorizadas, tais como a pressão, o caudal instantâneo e o totalizador, apresentadas no *display* do caudalímetro ilustrado na Figura 5.5.



Figura 5.5: *Display* do caudalímetro.

Conversor TCP/IP

Conforme referido anteriormente, o conversor TCP/IP é o equipamento que desempenha a função de interface entre a rede Modbus RTU e a Ethernet, permitindo a comunicação eficiente entre o sistema de monitorização e os dispositivos de medição instalados. Para tal, é necessário realizar a identificação correta do equipamento na rede Ethernet, com a qual vai comunicar através do protocolo Modbus TCP. Além disto, é necessária a configuração adequada dos parâmetros de comunicação referentes à rede Modbus RTU. Isto, é possível efetuar através de um servidor *web* ou da aplicação MyConfig, sendo esta última a utilizada no presente caso.

Os parâmetros necessários para a configuração dos conversores na rede Ethernet, bem como a indicação da porta do bastidor à qual cada dispositivo deve ser ligado, foram disponibilizados pelo departamento de IT. Neste contexto, a Tabela 5.9 apresenta as principais características atribuídas a cada conversor TCP/IP instalado no sistema, incluindo o barramento associado, o endereço IP definido, o bastidor correspondente e a respetiva porta de ligação.

Tabela 5.9: Parâmetros de configuração dos conversores TCP/IP implementados.

Equipamento	Barramento	IP	Bastidor	Porta
TCP1RS+	1 - PT	10.121.240.74	I	29
TCP1RS+	2 - SMT	10.121.240.75	I	30
TCPRS1+	3 - PT + SMT	10.121.240.17	I	8
TCP2RS+	4 - FAS + CSI	10.121.240.56	F	15
TCPRS1+	5 - WHS + CAB	10.121.240.19	D	11
TCPRS1+	6 - ESC	10.121.240.18	C	44

Para garantir a correta identificação e comunicação de cada equipamento na rede Ethernet, é fundamental atribuir a cada conversor um endereço IP único. Adicionalmente, devem ser configurados os parâmetros de comunicação da rede Modbus, tanto

para a interface série por Modbus RTU, como para a comunicação na rede através do protocolo Modbus TCP. Os parâmetros da comunicação série devem ser definidos conforme os valores previamente referidos, enquanto, no caso da comunicação na rede, deve ser configurado o protocolo Modbus TCP e a porta de comunicação 502, responsável por viabilizar a comunicação do equipamento através do protocolo Modbus. O Anexo C.2 apresenta as configurações de um dos conversores implementados no caso de estudo, realizadas através da aplicação MyConfig.

5.1.6 Execução das atividades planejadas

A elaboração do caderno de encargos permitiu identificar e estruturar as ações necessárias para a implementação do projeto de monitorização. As intervenções realizadas, conforme planeado, englobaram as seguintes operações:

- Instalação de 12 novos analisadores de energia e 36 TI nos circuitos definidos;
- Desinstalação de seis analisadores de energia e 27 TI, seguida da respetiva reinstalação nos novos circuitos selecionados;
- Instalação de três novas *gateways* para suportar a integração de todos os equipamentos implementados na instalação;
- Criação de uma infraestrutura de comunicação robusta, estruturada e devidamente documentada;
- Parametrização de todos os dispositivos integrados no caso de estudo;
- Validação final do correto funcionamento dos equipamentos instalados.

A Tabela 5.10 apresenta o material adquirido para a concretização das tarefas acima mencionadas, com base nas recomendações do fornecedor dos equipamentos de medição e da empresa responsável pela execução dos trabalhos de instalação do projeto.

Tabela 5.10: Material adquirido para a implementação do projeto.

Material	Quantidade
Analisadores de Energia	12 un
Transformadores de Intensidade	36 un
Conversores TCP/IP	3 un
Cabo de Potência (H05VV-F 4G1,5)	200 m
Cabo de Comunicação (LiYCY 2x0,75)	900 m
Cabo Ethernet (Cat6)	305 m

Considerando a identificação das ações a implementar, os circuitos selecionados e as respectivas localizações para instalação, elaborou-se um cronograma para a execução das atividades, conforme representado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Cronograma da implementação do projeto.

Fase do Projeto	Mês 1				Mês 2				Mês 3				Mês 4			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Criação da Infraestrutura de Comunicação	x	x	x	x												
Desinstalação dos Equipamentos						x	x	x								
Instalação dos Equipamentos									x	x	x	x	x	x	x	x
Parametrização e Integração na Rede de Comunicação															x	x
Verificações Finais															x	x

Este cronograma revelou-se uma ferramenta essencial na gestão do projeto, permitindo alinhar a execução das tarefas com as atividades produtivas da unidade fabril. Desta forma, foi possível conciliar os trabalhos do projeto com a atividade industrial, otimizando a execução das tarefas e assegurando o cumprimento dos prazos definidos, apesar de alguns constrangimentos identificados ao longo da implementação.

5.2 Software do Sistema Implementado

Inicialmente, este projeto previa a implementação da plataforma de gestão de energia da Bosch, que possibilitaria a monitorização dos consumos de diversos recursos do parque industrial. Contudo, devido ao anúncio da venda da unidade de negócio de Building Technologies da Bosch, que inclui o parque industrial de Ovar, a utilização desta solução deixou de ser estratégica para a unidade. Face a esta situação, decidiu-se manter o *software* de monitorização previamente instalado, o PowerStudio SCADA, que, até então, estava limitado à gestão exclusiva de equipamentos de medição de energia elétrica da marca Circutor. Para aumentar a flexibilidade e escalabilidade do sistema, procedeu-se à migração do *software* para a versão mais completa, PowerStudio SCADA – Deluxe. Esta atualização permitiu a integração de equipamentos de outros fabricantes que utilizam o protocolo de comunicação Modbus.

Ao longo do presente tópico será apresentado o *software* implementado no sistema de monitorização e de que modo se desenvolveu e configurou as funcionalidades de visualização dos dados obtidos.

5.2.1 Caracterização do PowerStudio

O PowerStudio é um *software* simples e preponderante de gestão e monitorização de energia, desenvolvido pela Circutor. Permite uma análise detalhada dos consumos energéticos e, apresenta-se como uma ferramenta fundamental para otimizar a eficiência energética de uma instalação. Além disto, faculta o controlo de sistemas existentes na instalação, como por exemplo, iluminação, aquecimento e ar condicionado.

Na sua versão *standard*, o *software* permite a configuração e monitorização em tempo real de um número limitado de equipamentos, apresentando os dados através de gráficos e tabelas. No entanto, dada a diversidade e o número de dispositivos presentes numa instalação, torna-se essencial a possibilidade de visualizar e atualizar múltiplos parâmetros simultaneamente. Deste modo, o PowerStudio SCADA expande as funcionalidades da versão *standard*, oferecendo uma visualização personalizada dos dados no painel SCADA, bem como a elaboração de relatórios detalhados sobre consumos, custos e outros indicadores relevantes. Isto contribui para a implementação de medidas preventivas ou corretivas, promovendo uma gestão mais eficiente da instalação. O servidor *web* integrado no PowerStudio SCADA possibilita o acesso remoto em tempo real e ao histórico de dados, através de um browser convencional, desde que o dispositivo esteja conectado à LAN devidamente configurada. Além disto, suporta a ligação de múltiplos utilizadores simultaneamente, garantindo controlo hierárquico através de perfis de acesso e credenciação. A versão PowerStudio SCADA – Deluxe complementa a versão SCADA ao permitir a integração de equipamentos de terceiros compatíveis com o protocolo Modbus. Adicionalmente, viabiliza a interligação com sistemas SCADA externos através do protocolo *Open Platform Communications* (OPC), tornando-se uma solução viável para ambientes mais exigentes. Assim como mencionado anteriormente, esta última versão será implementada no projeto através da migração da versão SCADA.

O PowerStudio contempla três componentes principais, conforme ilustrado na Figura 5.6, os quais garantem a flexibilidade e a eficácia na monitorização e apresentação dos dados, sendo sucintamente descritos a seguir:

- Editor - permite a configuração dos equipamentos, a definição de *Key Performance Indicator* (KPI) e o desenvolvimento de ecrãs, relatórios e alarmes personalizados, garantindo uma gestão eficiente e adaptada às necessidades do utilizador;

- Client - proporciona uma interface intuitiva para a monitorização e análise em tempo real, permitindo a visualização de ecrãs, relatórios, gráficos, tabelas e alarmes;
- Engine - responsável pela aquisição, processamento e disponibilização dos dados obtidos, assegurando uma comunicação contínua e independente com os dispositivos de medição. Atua como servidor central, garantindo a integridade e fiabilidade das informações processadas.

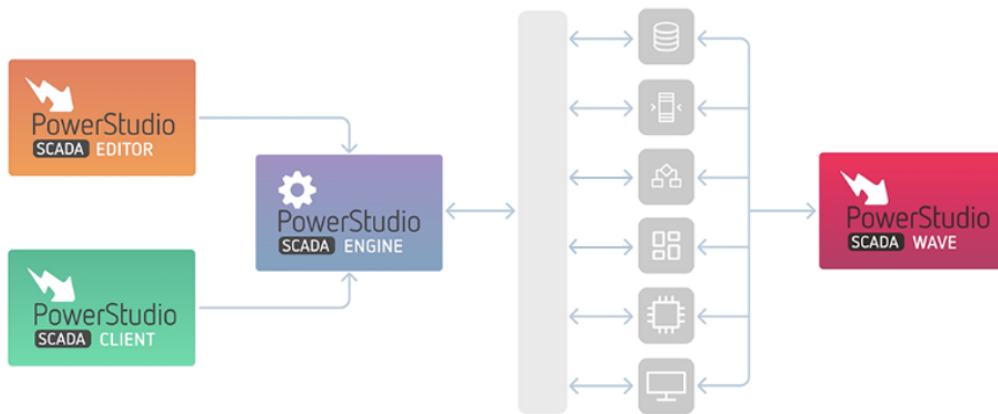


Figura 5.6: Arquitetura do *software* PowerStudio; adaptado de [105].

Recentemente, surgiu a ferramenta Wave que constitui um avanço significativo na interface do PowerStudio, proporcionando uma experiência de navegação e edição mais intuitiva e eficiente através da *web*. Desenvolvida com o objetivo de otimizar a interação do utilizador com o sistema, tornando a sua utilização mais simples, acessível e dinâmica a partir de qualquer navegador. Com um design moderno e funcional, o PowerStudio Wave melhora a experiência de utilização e eficiência do sistema, tornando a gestão das suas funcionalidades mais fluida e produtiva.

Apesar das vantagens que o PowerStudio Wave oferece ao utilizador, esta ferramenta não foi utilizada no desenvolvimento e configuração do sistema devido a problemas técnicos relacionados com a sua integração. Esta situação não foi resolvida a tempo, uma vez que a ferramenta era demasiado recente para o contexto do projeto. Assim, as configurações foram realizadas utilizando o PowerStudio Editor, garantindo que os elementos fossem adaptados às necessidades específicas da instalação e às exigências de monitorização e análise.

No tópico seguinte será detalhado o processo de configuração do *software* de monitorização, com destaque para as funcionalidades do PowerStudio Editor que possibilitaram a visualização eficaz dos dados no Client.

5.2.2 Desenvolvimento e configuração

Para garantir uma monitorização eficaz, tornou-se essencial adquirir um conhecimento aprofundado das funcionalidades facultadas pelo *software* PowerStudio Editor. Esta plataforma possibilita a parametrização dos dispositivos da rede de comunicação, a criação de ecrãs interativos e a elaboração de relatórios detalhados com indicadores de desempenho.

Antes de proceder a qualquer desenvolvimento no Editor, é crucial realizar a configuração do motor do programa. Conforme ilustrado na Figura 5.7, este processo consiste na definição do endereço IP do servidor, bem como na indicação da porta de saída destinada à aplicação *web*.

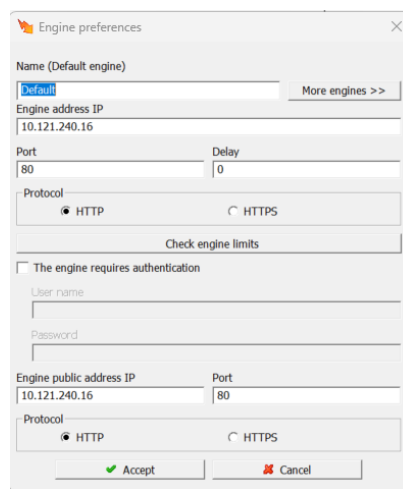


Figura 5.7: Configuração do motor do programa.

Esta etapa é determinante para assegurar a correta transmissão de dados entre os dispositivos monitorizados e a interface de visualização. Após qualquer ajuste realizado no *software* de edição, torna-se indispensável exportar as configurações para a aplicação, conforme representado na Figura 5.8, de modo a confirmar que as modificações efetuadas sejam devidamente refletidas no sistema de monitorização.

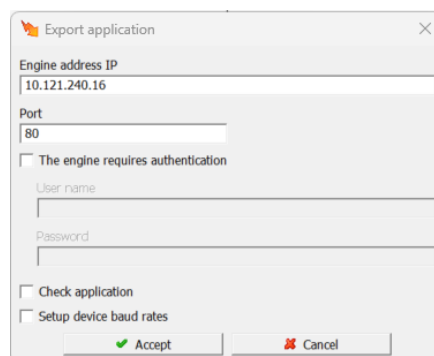


Figura 5.8: Exportação das configurações efetuadas para a aplicação.

Assim, procede-se à apresentação da metodologia adotada para a configuração dos equipamentos de monitorização, o desenvolvimento dos ecrãs e a elaboração dos relatórios do *software* de visualização.

Equipamentos

Os equipamentos de monitorização podem ser classificados em dois grupos: os que apresentam uma ligação direta ao sistema ou conversores e aqueles que requerem conexão a outros dispositivos para que o *software* consiga estabelecer comunicação com eles. Deste modo, o primeiro grupo será designado como equipamentos de primeiro nível, enquanto o segundo será referido como dispositivos de segundo nível. Para estabelecer a rede de comunicação no *software* de edição, é necessário, em primeiro lugar, adicionar um equipamento de primeiro nível, como demonstrado na Figura 5.9, dado que este constitui a base da rede de comunicação.

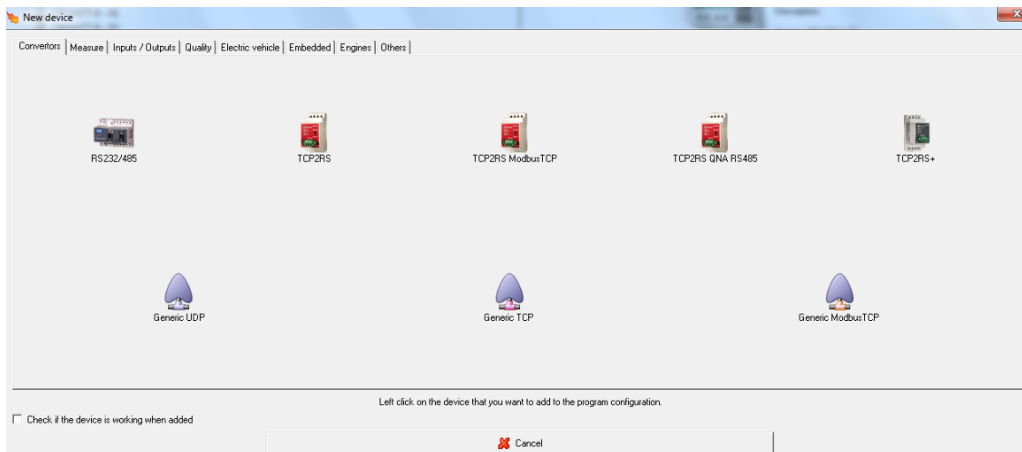


Figura 5.9: Adicionar um equipamento de primeiro nível.

Nesta janela, estão disponíveis equipamentos da marca Circutor, bem como dispositivos genéricos compatíveis com diferentes fabricantes, desde que suportem as conexões *User Datagram Protocol* (UDP), TCP ou Modbus TCP. No presente projeto, foram utilizados exclusivamente conversores da marca Circutor, no entanto, a configuração de um equipamento genérico segue o mesmo processo. Após a seleção do equipamento instalado, torna-se fundamental proceder à configuração dos respetivos parâmetros, conforme ilustrado na Figura 5.10.

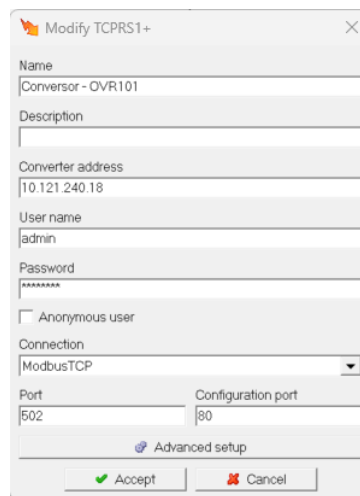


Figura 5.10: Configuração dos parâmetros de um equipamento de primeiro nível.

A configuração inclui a atribuição de um nome ao equipamento e a definição do endereço IP, de acordo com o determinado pelo departamento de IT. Além disso, é necessário selecionar a conexão Modbus TCP e configurar as portas de comunicação, nomeadamente a porta 502, que é utilizada para a comunicação via Modbus TCP, e a porta de configuração 80.

Após a integração do equipamento de primeiro nível, é possível efetuar a adição de um equipamento de segundo nível, o qual deverá estar fisicamente conectado ao equipamento previamente instalado. No âmbito do presente projeto, foram utilizados analisadores de energia da marca Circutor, assim como dispositivos de medição provenientes de outros fabricantes. A seguir, serão descritos os métodos de adição e configuração dos respetivos equipamentos. A Figura 5.11 apresenta os equipamentos de segundo nível da marca Circutor que podem ser incorporados no sistema.

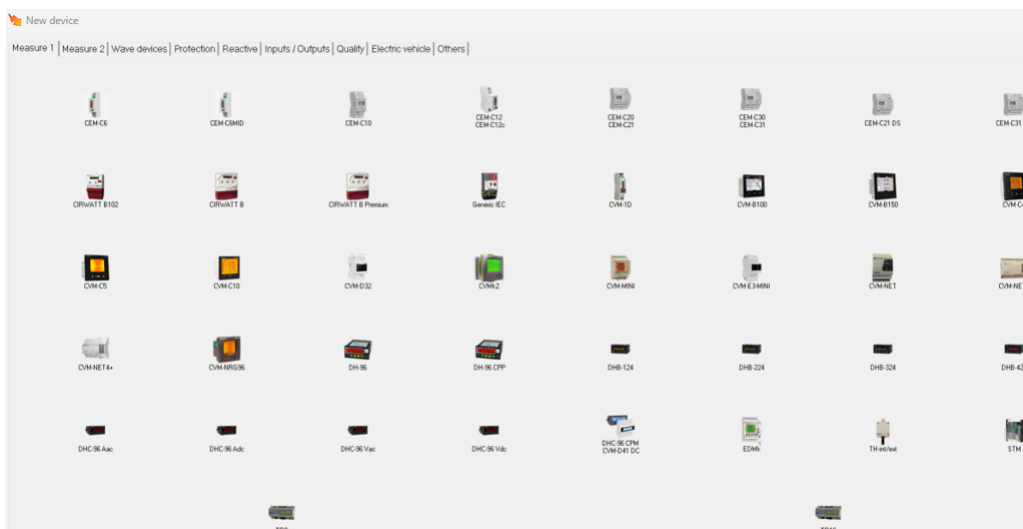


Figura 5.11: Adicionar um equipamento de segundo nível.

Uma vez efetuada a seleção correta do equipamento instalado, neste caso trata-se de um analisador de energia, é imprescindível definir o nome a atribuir ao dispositivo, bem como o número de periférico estabelecido nos barramentos de comunicação. Esta configuração é essencial para garantir a correta comunicação no sistema, tal como apresentado na Figura 5.12.

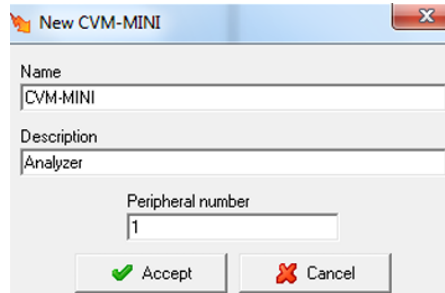


Figura 5.12: Configuração de um analisador de energia.

O utilizador consegue parametrizar localmente a relação de transformação dos TI diretamente no analisador de energia. Contudo, esta configuração também pode ser efetuada remotamente através do *software* de edição, como ilustrado na Figura 5.13.

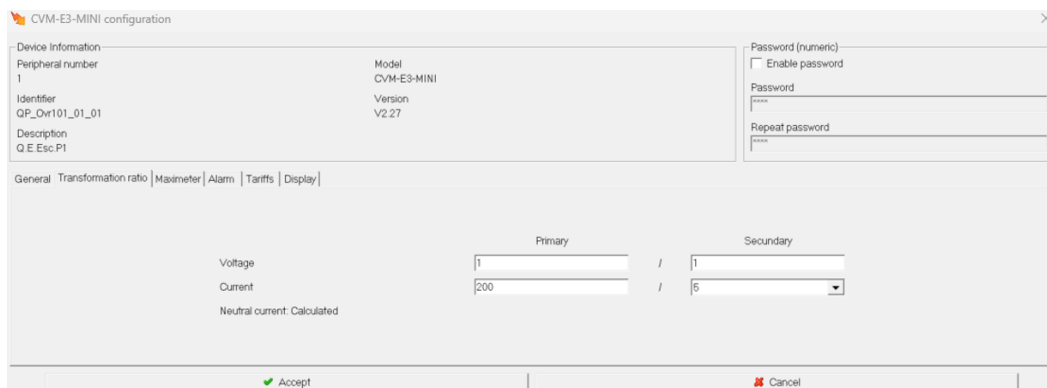


Figura 5.13: Configuração da relação de transformação dos TI de um analisador de energia.

Adicionalmente, importa salientar que existem versões mais antigas dos equipamentos que não dispõem de *display*, sendo, nestes casos, a configuração exclusivamente realizada através do *software*.

Caso seja necessário adicionar um equipamento de outro fabricante, deverá ser selecionado um equipamento genérico Modbus. A configuração deste dispositivo requer a consulta da documentação técnica dos registos Modbus do equipamento, pois é necessário definir manualmente os valores a monitorizar, incluindo os respetivos endereços e registos a ler. A Figura 5.14 exemplifica este processo de configuração.

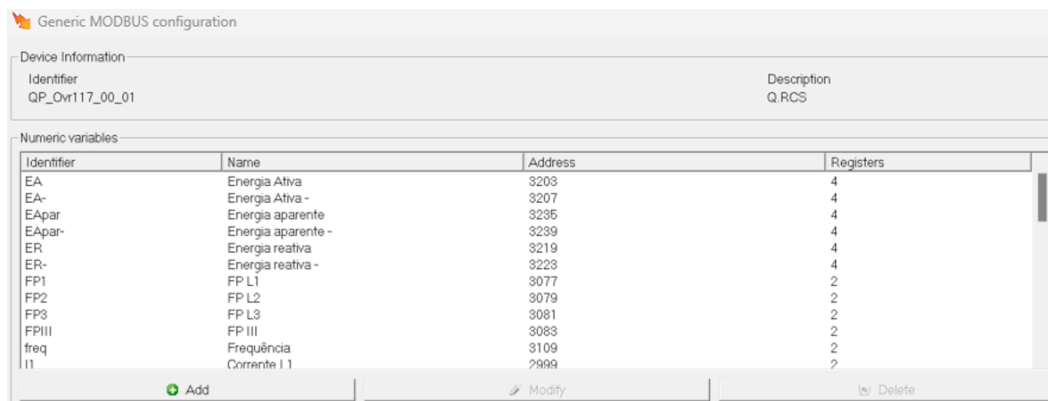


Figura 5.14: Configuração de um equipamento genérico Modbus.

Para tal, é possível utilizar os códigos de função de leitura e/ou escrita do protocolo Modbus para controlar o estado de entradas e saídas digitais, bem como para gerir registos de entrada e de retenção.

Ecrãs

A elaboração de ecrãs no *software* PowerStudio Editor constitui um elemento fundamental para a monitorização e controlo eficientes das instalações em estudo. A representação visual estruturada de informações críticas permite ao utilizador tomar decisões fundamentadas com base no estado operacional da instalação. Para criar, modificar ou eliminar ecrãs no *software* de edição, o utilizador dispõe de um cabeçalho de edição, conforme apresentado na Figura 5.15.

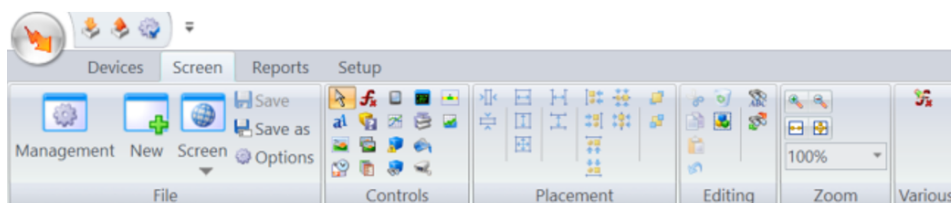


Figura 5.15: Cabeçalho de edição dos ecrãs SCADA.

Se o utilizador pretender criar um novo ecrã SCADA, deverá atribuir-lhe um nome e definir as respetivas dimensões, assim como demonstrado na Figura 5.16.

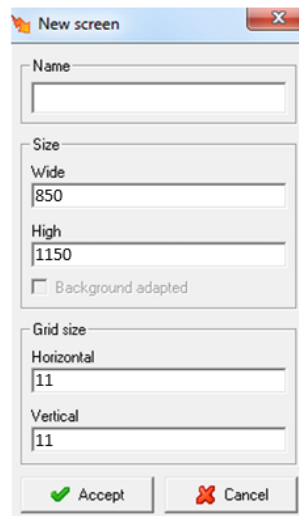


Figura 5.16: Elaboração de um novo ecrã SCADA.

Para assegurar a uniformidade na apresentação, foi padronizada a dimensão de 850 *pixels* de largura por 1 150 *pixels* de altura para todos os ecrãs.

Uma vez criado o ecrã, é necessário proceder à sua configuração. Para tal, o utilizador deve recorrer às ferramentas disponibilizadas pelo PowerStudio Editor para o processo de criação e personalização de ecrãs SCADA, conforme ilustrado na Figura 5.17.

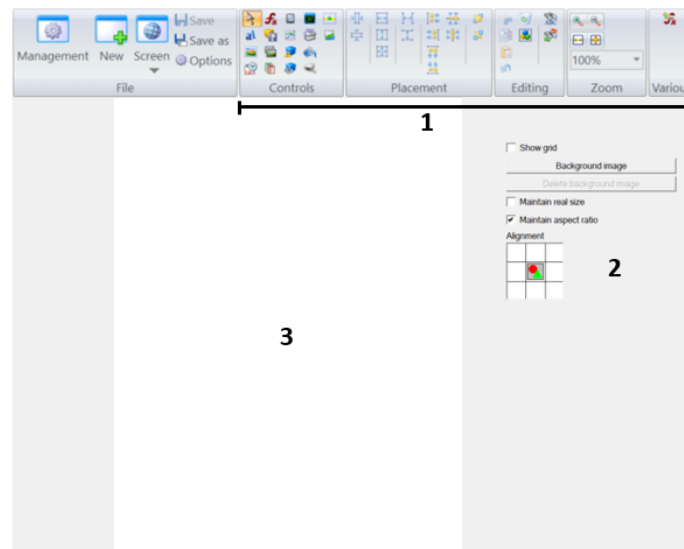


Figura 5.17: Janela de criação e personalização de ecrãs SCADA.

A janela de edição do ecrã é composta por três áreas principais, sendo sucintamente explicadas de seguida:

1. Ferramentas de edição - esta secção apresenta as diversas ferramentas disponibilizadas pelo *software* para a criação de controlos e componentes gráficos.

Entre as opções disponíveis, destacam-se a inserção de imagens e textos, a criação de ligações para outros ecrãs, a visualização de valores em tempo real de equipamentos de monitorização, bem como a utilização de tabelas, gráficos e a manipulação de variáveis, entre outras funcionalidades. A interface das ferramentas é intuitiva, permitindo a elaboração do *layout* do ecrã de forma rápida e eficiente;

2. Painel de informações - o painel exibe as configurações detalhadas do controlo ou elemento gráfico selecionado, permitindo ao utilizador ajustar propriedades como cores, unidades de medida e comportamentos específicos, de acordo com as condições de operação;
3. Área de *design* do ecrã SCADA - esta área destina-se à apresentação do *design* visual do ecrã SCADA, onde todos os elementos gráficos adicionados são organizados. A edição é dinâmica e visual, permitindo que o utilizador consiga observar, em tempo real, as modificações realizadas.

A interação entre estas três áreas torna o processo de desenvolvimento de ecrãs no PowerStudio Editor mais intuitivo e eficiente, agilizando a personalização das interfaces e garantindo que cada ecrã satisfaça as necessidades específicas da instalação monitorizada. A Figura 5.18 exibe a aplicação prática das ferramentas de edição na construção da *dashboard* do *software* de visualização.

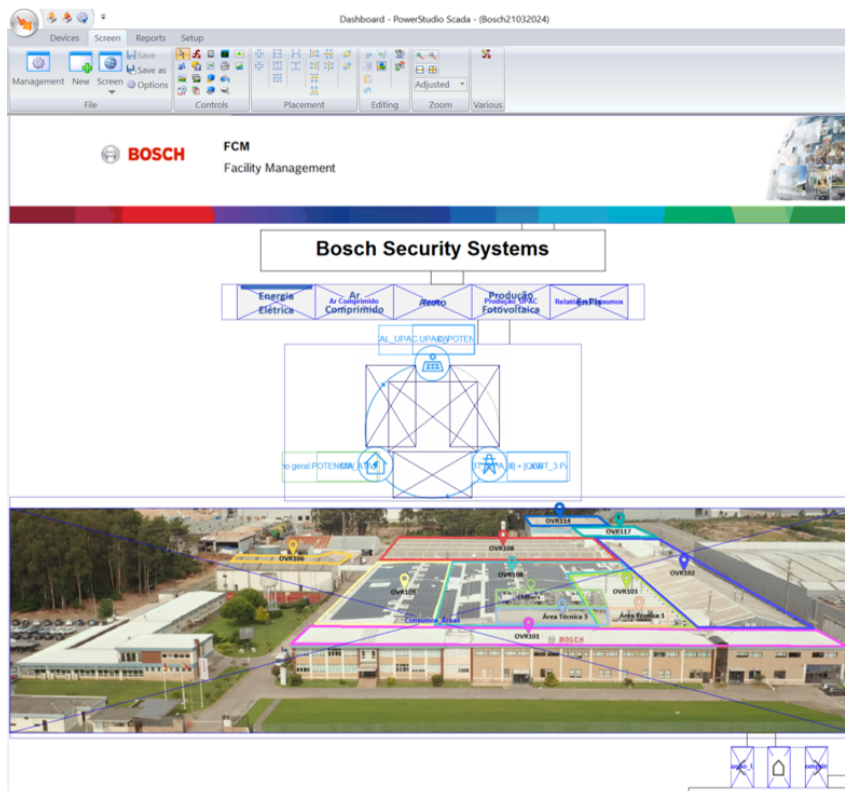


Figura 5.18: *Dashboard* do *software* de visualização.

Relatórios

A elaboração e configuração de relatórios no *software* PowerStudio Editor desempenham um papel essencial na análise e documentação dos dados operacionais. Este processo partilha algumas semelhanças com a criação de ecrãs, no entanto, distingue-se pelo conjunto de ferramentas disponíveis e pela sua finalidade para o cliente. Assim, enquanto os ecrãs oferecem uma visualização interativa e dinâmica, os relatórios estruturam a informação de forma organizada, facilitando a análise e interpretação dos dados.

De modo que o utilizador possa criar, alterar ou remover relatórios do *software*, é disponibilizado um cabeçalho de edição como o apresentado na Figura 5.19.

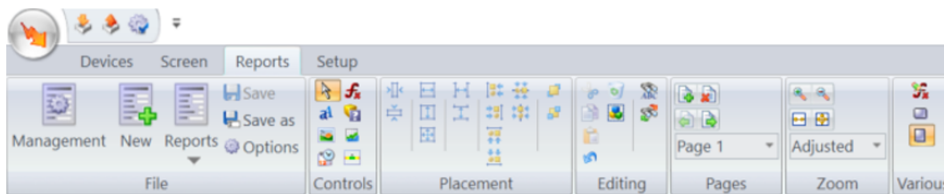


Figura 5.19: Cabeçalho de edição dos relatórios.

Nesta fase, é necessário atribuir um nome ao relatório que se pretende criar, garantindo a sua identificação exclusiva no sistema. Além disto, deve-se definir as dimensões da página, conforme representado na Figura 5.20.

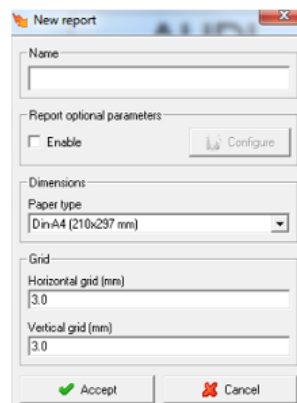


Figura 5.20: Elaboração de um novo relatório.

Definiu-se que o formato padrão de papel adotado para todos os relatórios criados no *software* será o Din-A4, com o propósito de uniformizar a apresentação dos documentos.

Após a criação do relatório, é apresentada uma janela de edição composta por três áreas de ação, conforme ilustrado na Figura 5.21, semelhantes às abordadas anteriormente para a elaboração e configuração dos ecrãs SCADA.

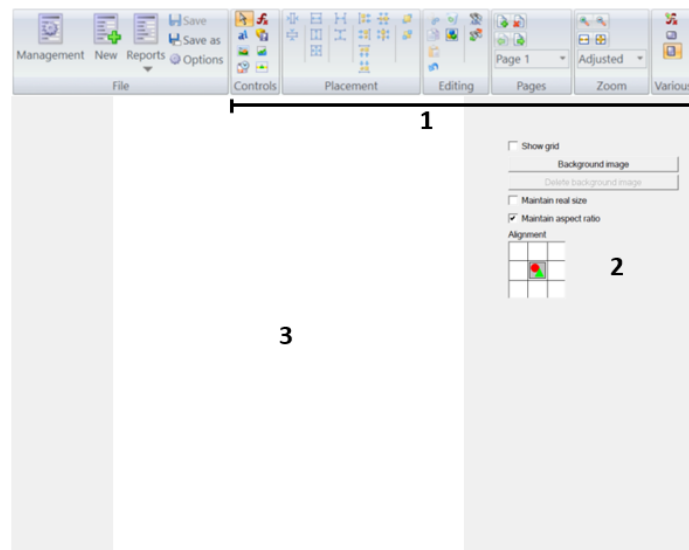


Figura 5.21: Janela de criação e personalização de relatórios.

As ferramentas de edição disponíveis para a configuração de relatórios incluem opções para definir períodos de análise de dados, adicionar textos e imagens, realizar cálculos de variáveis, entre outras. Estas funcionalidades permitem a personalização do conteúdo, garantindo a sua adaptação às necessidades específicas da instalação monitorizada. A Figura 5.22 exemplifica a aplicação das ferramentas mencionadas na criação de um relatório de consumos de energia elétrica.

Setor	Energia (kVvnh)	% face ao Geral	Energia (kgep)	Potência (kVv)
Q.G.B.T - Td	OTAL.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	AL.APMX]
Q. Ar Compr	IMIDO.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	DO.APMX]
Q.0.1.0 - Produção	CAO1.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	O1.APMX]
- Iluminação N	UCAO.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	AO.APMX]
- Q.0.1.1 Delta	WHAS.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	AS.APMX]
- Q.1.1 Office	PISO1.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	O1.APMX]
- Q.P.1 MAZE	MAZE.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	ZE.APMX]
- Q.1.3 Escritório	RFAM.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	AM.APMX]
Q.0.2.1 - RES	HERVA.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	VA.APMX]
Q.0.2.0 - SMT	HAS_STM]	L.AE])*100	*kgep_kwh	APC4MX]
- Forno REHM	MT.AEC1]	L.AE])*100	*kgep_kwh	APC1MX]
- Forno REHM	MT.AEC2]	L.AE])*100	*kgep_kwh	APC2MX]
- Forno REHM	MT.AEC3]	L.AE])*100	*kgep_kwh	APC3MX]
- UPS	MT.AEC4]	L.AE])*100	*kgep_kwh	APC4MX]
Q.P.3.0 - Office	PISOO.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	O0.APMX]
Q.E.3.A - Arm	IAZEM.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	EM.APMX]
Q.C.R	QCR.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	CR.APMX]
- Q. Clean Ro	ROOM.AE]	L.AE])*100	*kgep_kwh	DM.APMX]

Figura 5.22: Relatório de consumos de energia elétrica.

Capítulo 6

Validação da Solução

Ao longo deste capítulo é apresentada uma apreciação crítica da solução desenvolvida e implementada, avaliando a sua conformidade face aos objetivos inicialmente definidos e os resultados obtidos. Numa primeira fase, procede-se à validação do projeto em função dos objetivos estabelecidos, explicitando em que medida estes foram atingidos. Seguidamente, evidencia-se a relevância da solução para a Bosch Security Systems, destacando as principais funcionalidades disponibilizadas pelo *software* de monitorização. Em último lugar, realiza-se uma análise detalhada dos resultados alcançados, a qual inclui a descrição das ferramentas utilizadas, a identificação dos principais desafios enfrentados durante a implementação e a discussão de casos práticos que demonstram a eficácia da solução na deteção de eventos relevantes e na promoção da eficiência energética.

6.1 Validação Contra Objetivos

A validação da solução implementada foi efetuada com base nos objetivos definidos para o projeto, considerando igualmente as adaptações decorrentes do processo de *carve-out*. Conclui-se que os objetivos estabelecidos foram plenamente endereçados, assegurando o cumprimento da finalidade global do projeto. Importa ainda referir que os requisitos definidos para a concretização desses objetivos foram, na sua maioria, satisfeitos, destacando-se:

- A monitorização dos principais parâmetros elétricos, possibilitando a supervisão em tempo real e a consulta de históricos de consumo;
- A integração dos equipamentos através do protocolo Modbus, permitindo o controlo centralizado através da plataforma de monitorização;
- O desenvolvimento de ecrãs de supervisão personalizados e relatórios configuráveis, ajustados às necessidades da unidade industrial;
- A atualização da plataforma de monitorização e do servidor responsável pela execução do sistema, realizada pela empresa externa contratada em articulação com o departamento de IT.

Contudo, alguns requisitos não foram implementados por decisões estratégicas de gestão da empresa, nomeadamente:

- Instalação de novos pontos de monitorização de ar comprimido e azoto, excluída do plano por ultrapassar o requisito orçamental definido;
- Configuração de alertas automáticos via *e-mail*, não concretizada devido à indisponibilidade de suporte do departamento de IT para a parametrização do servidor *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP). Esta tarefa foi relegada como última prioridade, devido ao facto de precisarem de estar intimamente conectados com os processos associados ao *carve-out*.

6.2 Validação Institucional

A introdução do sistema de monitorização na Bosch Security Systems representou uma mais-valia significativa ao nível da gestão operacional e da sustentabilidade. Esta integração dotou a instalação de uma ferramenta que suporta a análise contínua dos consumos energéticos, permitindo uma visão mais clara e estruturada sobre os padrões de utilização de energia.

De seguida, será apresentada uma descrição detalhada das principais funcionalidades disponibilizadas pelo *software* de visualização, evidenciando os recursos e indicadores que podem ser consultados diretamente na plataforma.

6.2.1 Funcionalidades

O *software* de monitorização PowerStudio Client, desenvolvido e implementado no âmbito deste projeto, permite a supervisão detalhada e em tempo real dos consumos energéticos da fábrica. A sua interface gráfica disponibiliza uma série de funcionalidades que facilitam a análise e interpretação dos dados por parte dos utilizadores, contribuindo para uma tomada de decisão mais informada e eficiente.

Uma das funcionalidades principais do sistema é a monitorização contínua do estado dos equipamentos de medição instalados, conforme ilustrado na Figura 6.1.

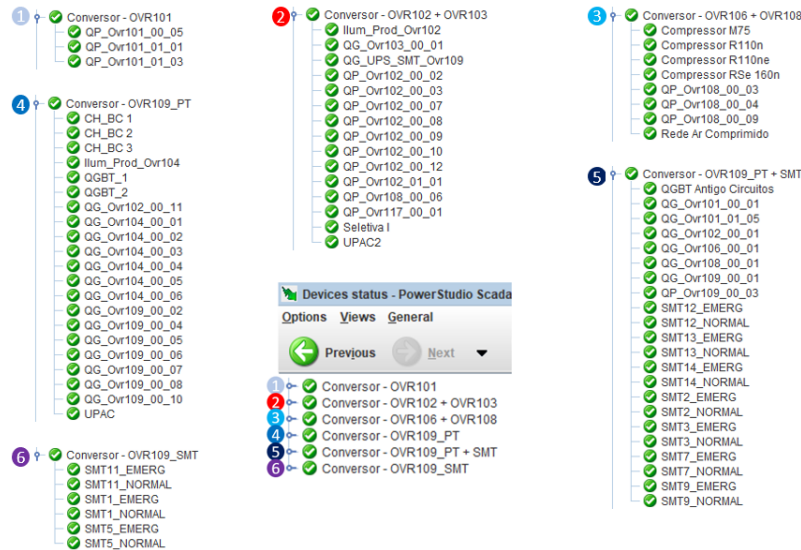


Figura 6.1: Equipamentos monitorizados através do *software*.

É possível verificar que todos os dispositivos estão a comunicar corretamente com o sistema, dado que se encontram assinalados com o estado a verde. Adicionalmente, a legenda dos principais símbolos disponibilizados pelo *software*, apresentada na Figura 6.2, permite identificar eventuais falhas de comunicação, erros de configuração ou anomalias nos próprios equipamentos.

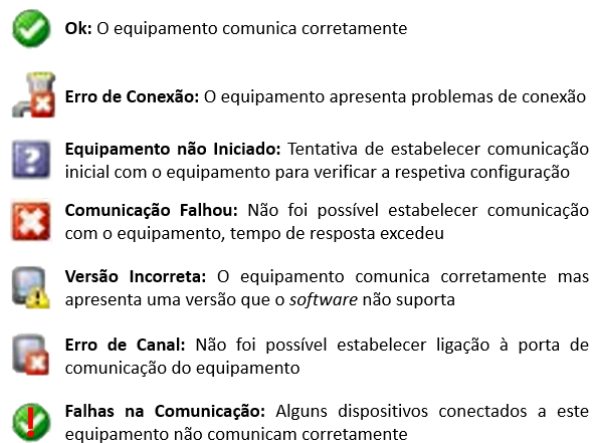


Figura 6.2: Legenda dos símbolos de estado dos equipamentos no *software*.

Atualmente, encontram-se a ser monitorizados, através do *software*, um total de 75 equipamentos de medição, dos quais 74 são utilizados para a monitorização dos consumos de energia elétrica e um corresponde a um caudalímetro, destinado à medição do consumo da rede de ar comprimido.

Ao iniciar o *software*, o utilizador é automaticamente direcionado para o ecrã principal, ou *dashboard*, conforme representado na Figura 6.3.

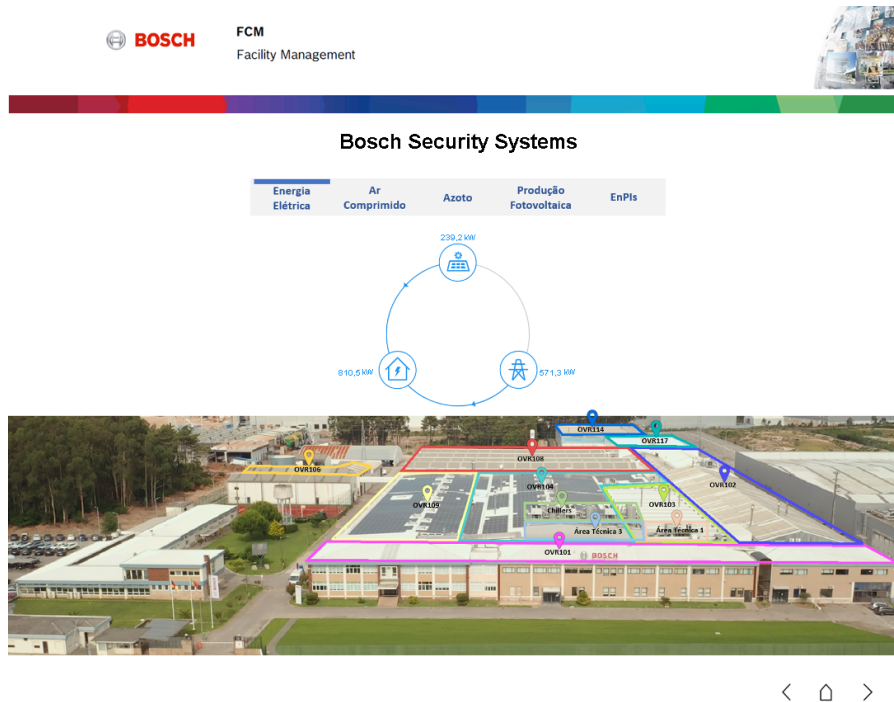


Figura 6.3: *Dashboard* do *software* de monitorização.

Este ecrã constitui o ponto de entrada para a navegação pelas diversas vertentes do sistema de monitorização, nomeadamente: energia elétrica, ar comprimido, azoto, produção fotovoltaica e indicadores de desempenho energético.

Por predefinição, o *dashboard* apresenta a vertente relativa à energia elétrica, fornecendo uma visão geral da unidade industrial. Neste contexto, são disponibilizados dados consolidados sobre o consumo total de energia elétrica, discriminando a produção da UPAC e a energia proveniente da rede elétrica. Para além disso, este ecrã permite ao utilizador identificar as áreas da fábrica que estão a ser monitorizadas, excluindo explicitamente as zonas anteriormente pertencentes ao condomínio.

Ao selecionar qualquer uma das áreas da unidade fabril no *dashboard*, é apresentado o ecrã ilustrado na Figura 6.4, o qual exhibe os consumos instantâneos das diferentes zonas da instalação, bem como a respetiva percentagem face ao consumo total de energia elétrica.



Figura 6.4: Consumo instantâneo de energia elétrica nas diversas áreas.

Este ecrã permite ao utilizador aprofundar a análise, descentralizando o consumo por área. A seleção de uma zona específica conduz à abertura de um novo ecrã, onde são apresentados os principais consumidores dessa área, assim como a distribuição dos quadros elétricos que a compõem. Por exemplo, ao selecionar a área designada por OVR109, é disponibilizado o ecrã representado na Figura 6.5, que detalha os elementos de maior consumo energético e a organização dos respetivos quadros elétricos.

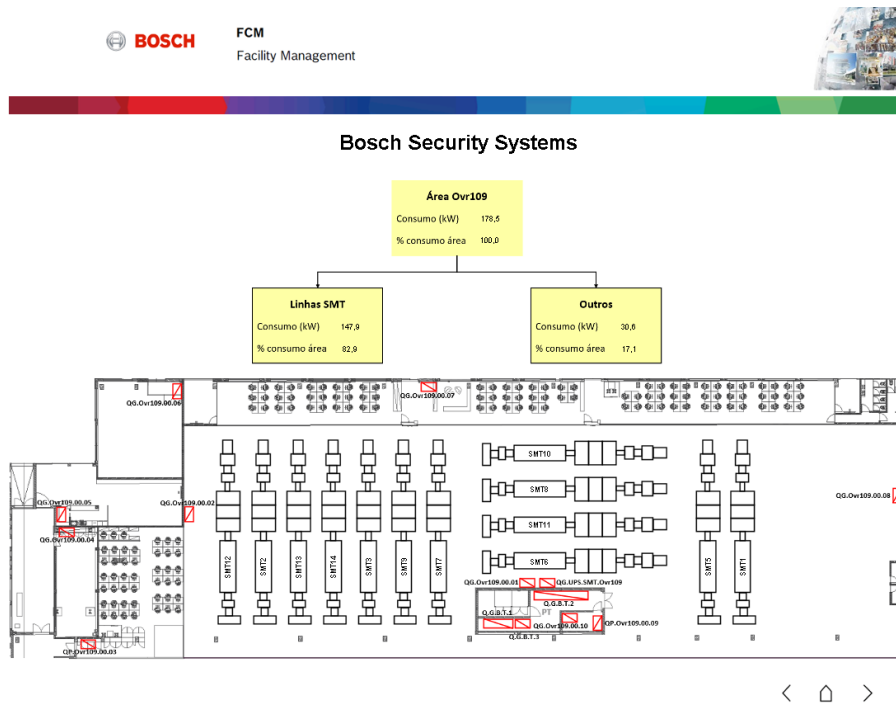


Figura 6.5: Consumo instantâneo de energia elétrica na área OVR109.

A partir deste ponto, é possível obter uma visualização mais segmentada da área selecionada. Ao clicar na componente correspondente às linhas SMT, o utilizador é redirecionado para o ecrã ilustrado na Figura 6.6.

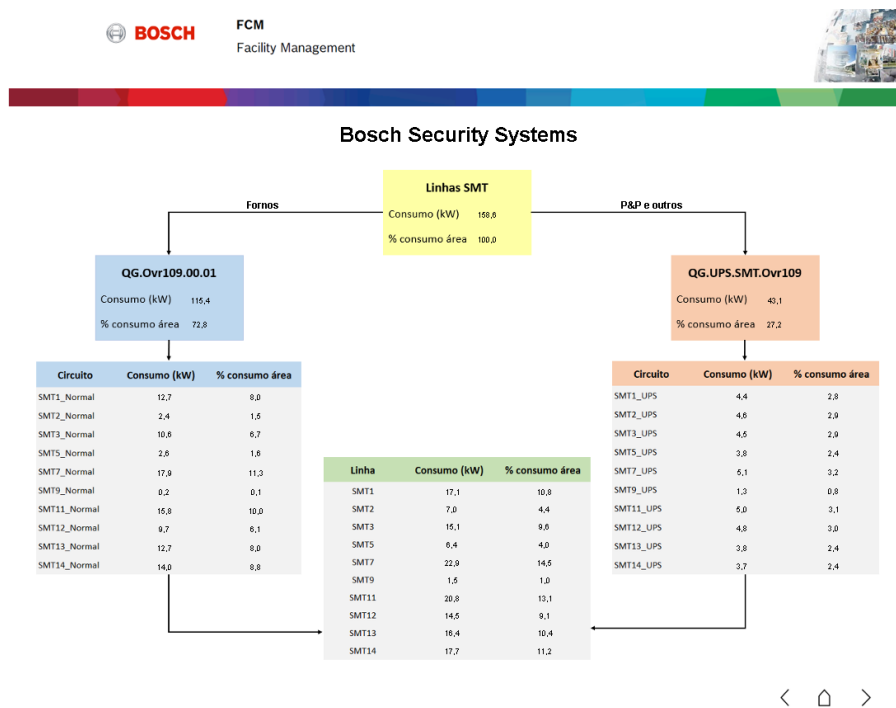


Figura 6.6: Consumo instantâneo de energia elétrica nas linhas SMT.

Neste ecrã, apresentam-se os valores de consumo instantâneo de cada componente das linhas SMT, bem como o consumo total agregado de cada linha. Em alternativa, o utilizador pode optar por consultar os consumos associados à categoria *Outros*, que agrupa os restantes quadros elétricos da área. Esta informação é apresentada no ecrã apresentado na Figura 6.7.

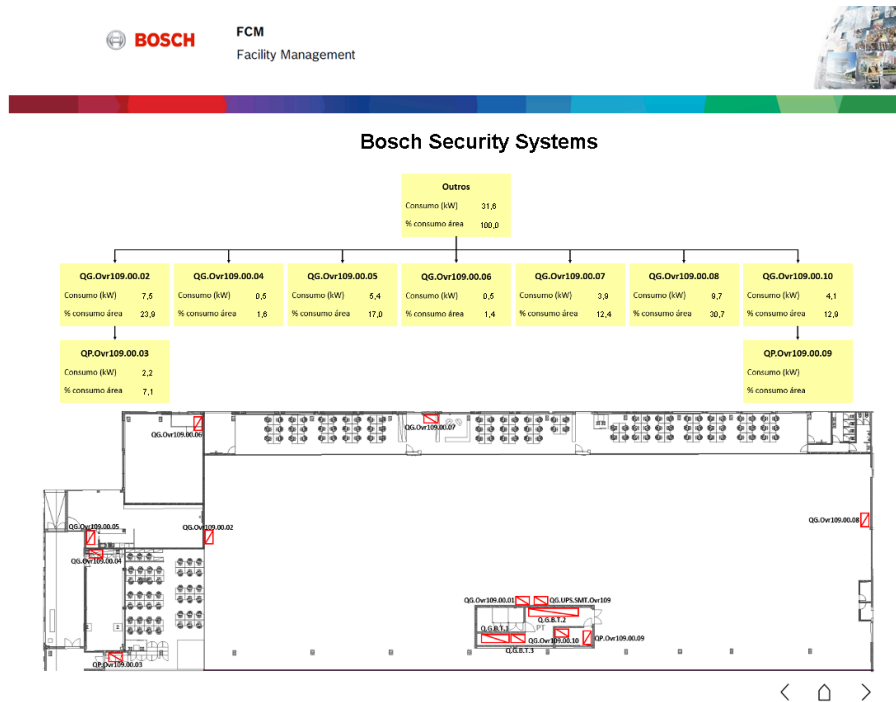


Figura 6.7: Consumo instantâneo de energia elétrica dos restantes quadros elétricos da área OVR109.

A vertente de ar comprimido faculta ao utilizador uma visão detalhada do desempenho energético associado à produção e distribuição deste recurso nos processos industriais do caso de estudo, conforme representado na Figura 6.8.

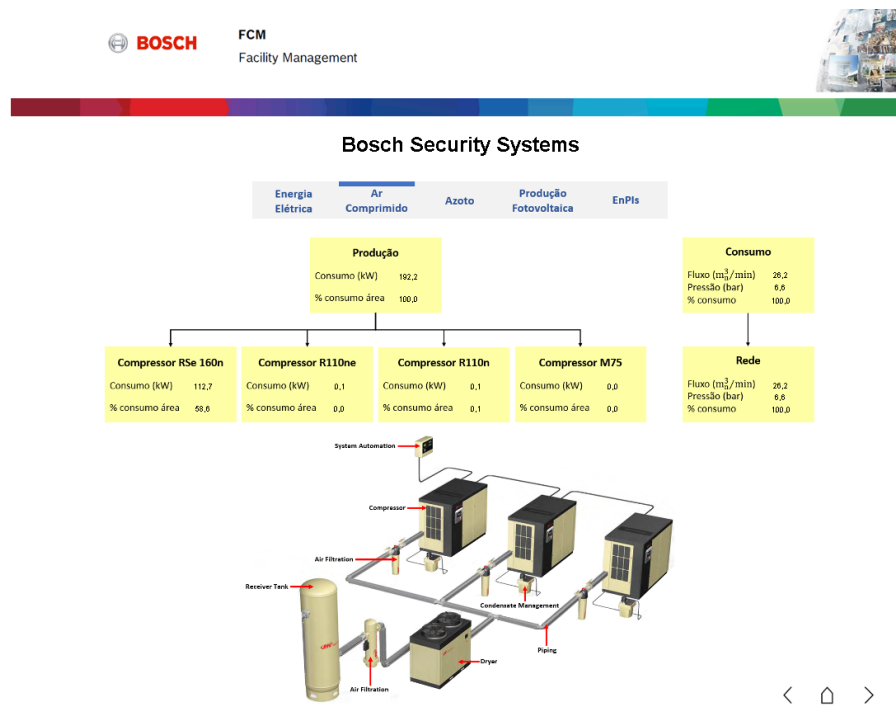


Figura 6.8: Consumos instantâneos nos equipamentos de ar comprimido.

Através do ecrã apresentado, é possível visualizar, em tempo real, o consumo de energia elétrica total associado à produção de ar comprimido. Esta informação encontra-se segmentada por compressor, permitindo identificar de forma individualizada o contributo energético de cada equipamento. Esta abordagem revela-se particularmente relevante, considerando que os compressores são, tipicamente, os elementos com maior representatividade no consumo elétrico da instalação de ar comprimido.

Complementarmente, o ecrã integra os dados provenientes do caudalímetro instalado no coletor principal da rede de ar comprimido. Este é o único equipamento do género presente no sistema de monitorização, uma vez que não foi possível instalar o dispositivo selecionado para monitorizar o consumo de ar comprimido na área SMT. O caudalímetro fornece, em tempo real, medições do fluxo volumétrico e da pressão da linha, variáveis fundamentais para a avaliação da correspondência entre a produção de ar comprimido e a procura real da instalação.

Embora no presente projeto não tenha sido possível implementar os equipamentos de monitorização de azoto inicialmente previstos, o software contempla um ecrã especificamente dedicado a este recurso. Nesse ecrã é apresentada uma imagem representativa da área de armazenamento e distribuição de azoto no parque industrial, conforme ilustrado na Figura 6.9.

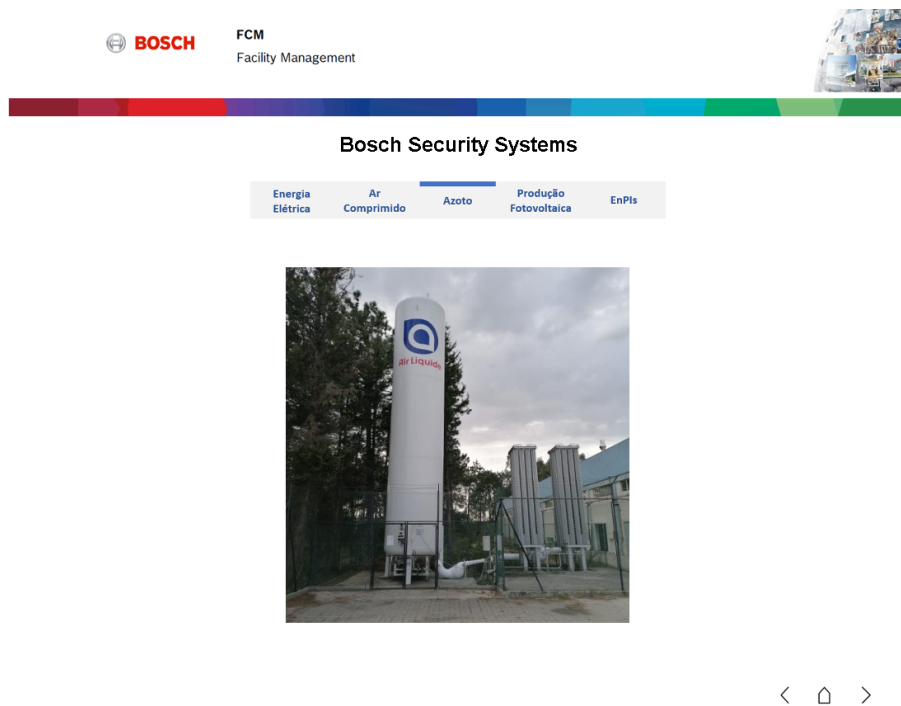


Figura 6.9: Ecrã do *software* dedicado à gestão do azoto.

Caso o utilizador pretenda consultar a produção fotovoltaica instantânea, poderá aceder ao ecrã demonstrado na Figura 6.10.

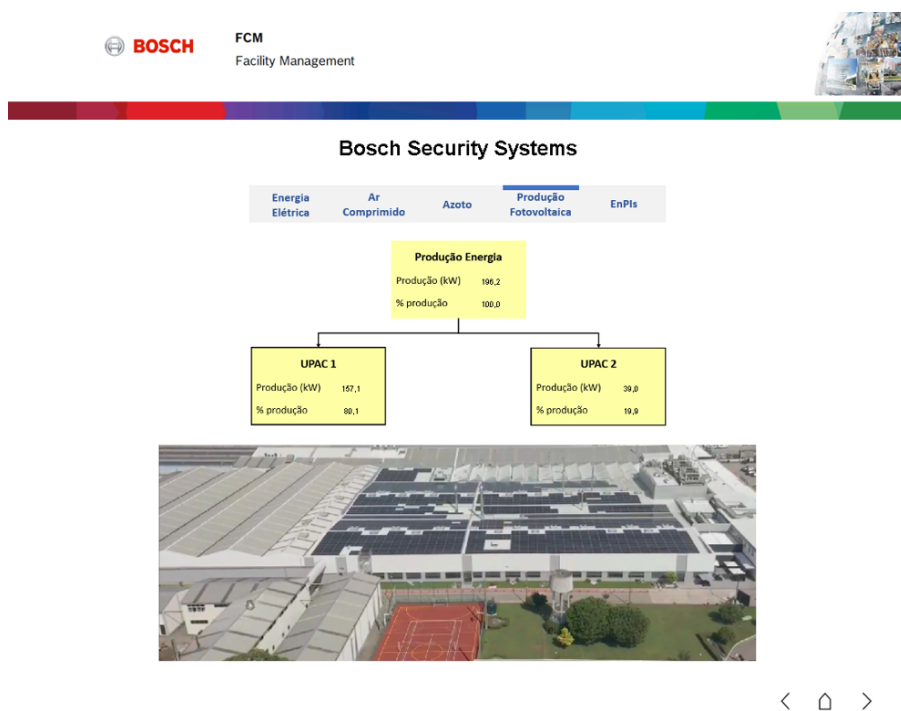


Figura 6.10: Produção de energia elétrica através das UPAC.

Apesar de o caso de estudo já dispor de um *software* dedicado à monitorização da

produção fotovoltaica, optou-se por integrar essa funcionalidade no *software* implementado no âmbito do presente projeto. Esta abordagem visa centralizar toda a informação relevante numa única plataforma, facilitando o acesso e a gestão dos dados. Os valores obtidos permitem aferir, de forma prática, se o sistema fotovoltaico está a operar de acordo com os níveis de produção expectáveis.

A última, e não menos importante, vertente do sistema de monitorização corresponde à análise dos indicadores de desempenho de energia, conforme apresentado na Figura 6.11.

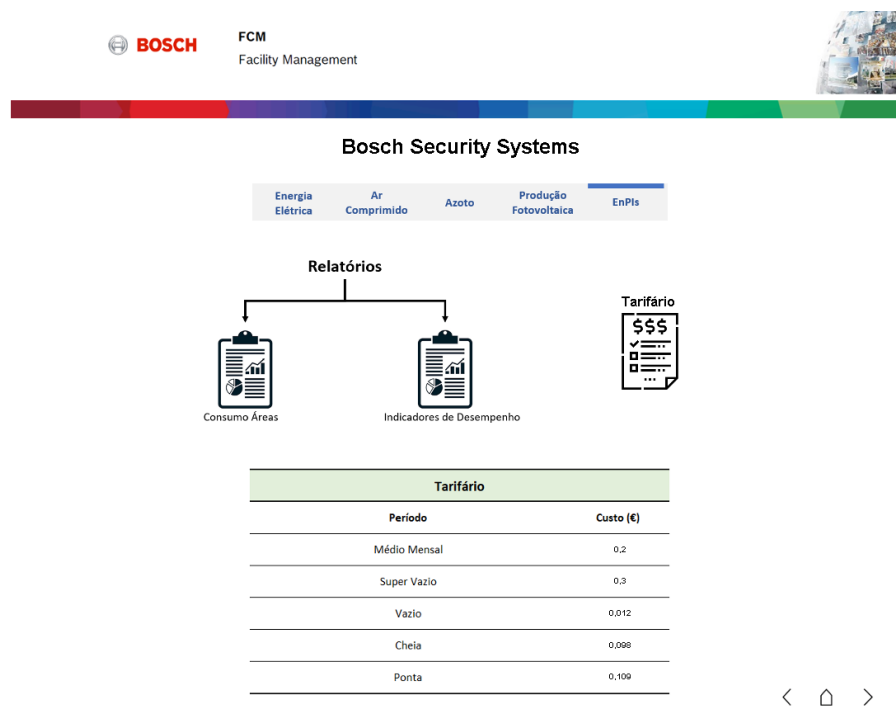


Figura 6.11: Ecrã dos indicadores de *performance* de energia.

Este módulo contempla a definição do tarifário energético a aplicar, permitindo o cálculo rigoroso dos custos associados ao consumo de energia. Esta personalização garante que os resultados reportados refletem de forma fidedigna a realidade contratual da organização no que diz respeito ao fornecimento de energia.

Adicionalmente, este ecrã disponibiliza ao utilizador o acesso a relatórios detalhados que oferecem uma visão clara e estruturada do consumo energético, distribuído pelos diversos pontos monitorizados na fábrica. No âmbito desta funcionalidade, destaca-se o relatório de custos, representado na Figura 6.12.



Indicadores de Desempenho de Energia

Relatório de Custos de: 13/07/2025 00:00:00 até 19/07/2025 00:00:00

Energia Elétrica

Centro de Custo	Energia [MWh]	% face ao Geral	Custo [€]
TOTAL	118,52	100,00	23.897,80
Rede	88,35	74,56	17.869,28
UPAC1	27,26	23,01	5.452,82
UPAC2	2,01	2,45	581,20
UPAC Total	30,17	25,46	6.028,42
OVR101	5,03	4,25	1.008,61
OVR102	9,07	7,65	1.813,68
OVR103	0,77	0,65	153,05
OVR104	11,59	9,78	2.318,09
OVR106	24,64	20,80	4.928,58
OVR108	7,44	6,28	1.488,83
OVR109	23,82	20,10	4.763,53
OVR114	0,00	0,00	0,00
OVR117	0,08	0,07	16,97
Área Técnica 1	2,38	2,01	475,84
Área Técnica 3	7,46	6,30	1.492,51
Chillers	11,10	9,37	2.220,44



Figura 6.12: Relatório de custos de energia elétrica num dado período.

Este relatório tem como principal objetivo elucidar os diversos centros de custo da empresa relativamente aos custos energéticos esperados, contribuindo de forma direta para o planeamento estratégico e financeiro da organização, nomeadamente no planeamento anual do negócio.

Além disto, os relatórios disponíveis constituem uma ferramenta de apoio à melhoria contínua, sendo elaborados e ajustados de acordo com as necessidades específicas da empresa. Este enfoque permite à organização tomar decisões informadas e sustentadas relativamente ao consumo energético, promovendo a eficiência e a sustentabilidade.

Independentemente da vertente selecionada, o *software* providencia a visualização gráfica de todos os parâmetros adquiridos pelos equipamentos de medição, bem como das variáveis calculadas pelo utilizador. A Figura 6.13 ilustra o gráfico da evolução do consumo total de energia elétrica ao longo de um determinado intervalo de tempo.

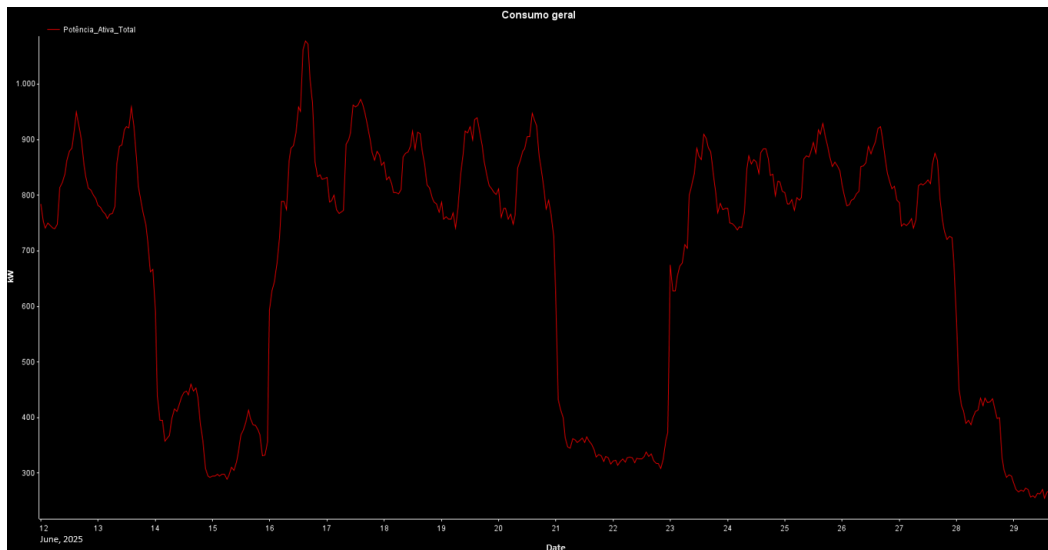


Figura 6.13: Gráfico do consumo total de energia elétrica num dado período.

Esta funcionalidade proporciona uma leitura mais intuitiva e imediata dos dados, facilitando a identificação de tendências, padrões de consumo e desvios em relação ao comportamento esperado. Além disto, permite uma avaliação objetiva do impacto de medidas implementadas, alterações de processo ou variações nas condições de operação, possibilitando a comparação entre diferentes variáveis ou períodos temporais numa mesma interface.

6.3 Análise de Resultados

O presente tópico visa avaliar os resultados decorrentes da implementação do sistema de monitorização. Numa primeira etapa, são apresentados os meios utilizados, evidenciando as ferramentas que suportaram o desenvolvimento do projeto e a redação da dissertação. Posteriormente, são analisados os principais desafios associados à implementação, salientando as restrições e constrangimentos que condicionaram o cumprimento do planeamento inicial. Por fim, procede-se à identificação e análise de eventos específicos, os quais demonstram a eficácia da solução adotada na deteção de ocorrências relevantes e na promoção da eficiência energética.

6.3.1 Meios utilizados

No âmbito do projeto, recorreram-se a diversas ferramentas, cada uma desempenhando um papel específico e complementar no desenvolvimento, implementação e análise do sistema de monitorização, bem como na elaboração da dissertação. De seguida, apresenta-se uma descrição sucinta da aplicação de cada ferramenta no contexto do projeto:

- PowerStudio Editor - fundamental para a configuração dos equipamentos e para o desenvolvimento dos ecrãs e relatórios do *software* de monitorização. Através desta ferramenta foi possível estruturar a base do sistema, definindo os parâmetros de funcionamento e os elementos gráficos necessários para a visualização dos dados;
- PowerStudio Client - constitui a interface de acesso para o utilizador, permitindo a monitorização em tempo real e a análise detalhada dos ecrãs, relatórios, gráficos e tabelas;
- Microsoft PowerPoint - utilizado principalmente para o desenvolvimento das representações gráficas que serviram de base à construção dos ecrãs e relatórios do *software* de monitorização. Adicionalmente, foi empregue na edição e tratamento de figuras integradas na dissertação;
- Aplicação MyConfig da Circutor - essencial para a parametrização dos conversores TCPRS1+, permitindo a correta comunicação e integração dos dispositivos no sistema de monitorização;
- AutoCAD - permitiu avaliar teoricamente os comprimentos dos barramentos de comunicação, otimizar o balanceamento dos equipamentos e definir as suas localizações, garantindo a conformidade do desenho técnico com os requisitos de implementação física;
- draw.io – adotado na elaboração de diagramas e esquemas presentes na dissertação, incluindo a arquitetura do sistema e a representação dos barramentos de comunicação, contribuindo para a clareza visual e a compreensão global do sistema;
- Microsoft Excel - aplicado na elaboração preliminar das tabelas apresentadas na dissertação, permitindo a organização estruturada de dados numéricos e comparativos. Posteriormente, os valores das tabelas foram transpostos para o formato LaTeX;
- Microsoft Word - serviu como ferramenta de apoio à redação preliminar dos textos da dissertação, antes da sua adaptação ao formato final em LaTeX;
- LaTeX - empregue para a produção do documento final da dissertação, possibilitando uma formatação profissional, rigorosa e adequada ao enquadramento académico.

Em síntese, a integração destas ferramentas revelou-se essencial para a implementação do projeto e para a elaboração da dissertação.

6.3.2 Desafios na implementação

Durante a implementação da solução de monitorização de recursos, diversos desafios surgiram na execução do projeto, originando atrasos e a necessidade de ajustes ao planeamento inicial. Estes desafios podem ser organizados nas seguintes vertentes:

- Requisito orçamental - o orçamento disponível revelou-se insuficiente face à ambição delineada na fase inicial do projeto, nomeadamente no que respeita ao número de equipamentos necessários para a monitorização e respetiva instalação. Consequentemente, foi necessário redefinir prioridades, optando-se pelo adiamento da instalação dos equipamentos destinados à monitorização de ar comprimido e azoto. Esta decisão visou assegurar a adequada alocação de recursos para os sistemas considerados mais relevantes na gestão energética e operacional;
- Constrangimentos na gestão da implementação - a coordenação das atividades com a empresa externa responsável pela instalação enfrentou obstáculos significativos, nomeadamente ao nível da gestão de personalidades conflituosas e com reduzido brio profissional. Assim, o ritmo de execução das tarefas foi comprometido, exigindo acompanhamento rigoroso e replaneamento recorrente das atividades;
- Restrições operacionais nas intervenções técnicas - a implementação dos novos TI implicou a realização de interrupções no fornecimento de energia elétrica nos respetivos pontos de instalação. Consoante os circuitos envolvidos, estas intervenções exigiram, desde paragens locais/parciais até paragens totais da fábrica. No entanto, considerando que a unidade industrial opera ininterruptamente em regime 24/7, a janela disponível para executar estas intervenções era reduzida e exigia grande esforço de planeamento. Isto, resultou em atrasos na implementação da solução e originou várias reprogramações do cronograma inicialmente previsto;
- Impacto do processo de *carve-out* - o processo de *carve-out* da unidade de negócios de Ovar afetou diretamente a estratégia tecnológica, tendo sido definida a alteração da plataforma de gestão de energia originalmente prevista. Esta alteração organizacional exigiu a reformulação da abordagem ao sistema de monitorização inicialmente planeado.

Apesar dos desafios suprarreferidos, a execução do projeto permitiu alcançar progressos significativos na monitorização de recursos, sendo estas dificuldades encaradas como oportunidades de aprendizagem para projetos futuros de natureza semelhante.

6.3.3 Identificação de eventos

A implementação da presente solução possibilitou o início da monitorização do caso de estudo durante o período remanescente do estágio. Apesar de se tratar de um intervalo de tempo relativamente curto, foi possível identificar um evento considerado anómalo, bem como detetar ocorrências associadas a ineficiências energéticas e oportunidades concretas de melhoria do desempenho energético.

As situações identificadas são descritas de seguida, evidenciando a importância da ferramenta de monitorização na deteção precoce de desvios e no suporte à tomada de decisões orientadas para a otimização dos consumos.

Consumo atípico linhas SMT

Durante o período de monitorização, foi identificado um pico no consumo total de energia eléctrica da instalação. A análise detalhada dos diversos consumos monitorizados permitiu localizar a origem desta ocorrência na área de produção, mais concretamente nas linhas de montagem SMT, destacando-se a linha SMT3, conforme representado na Figura 6.14.

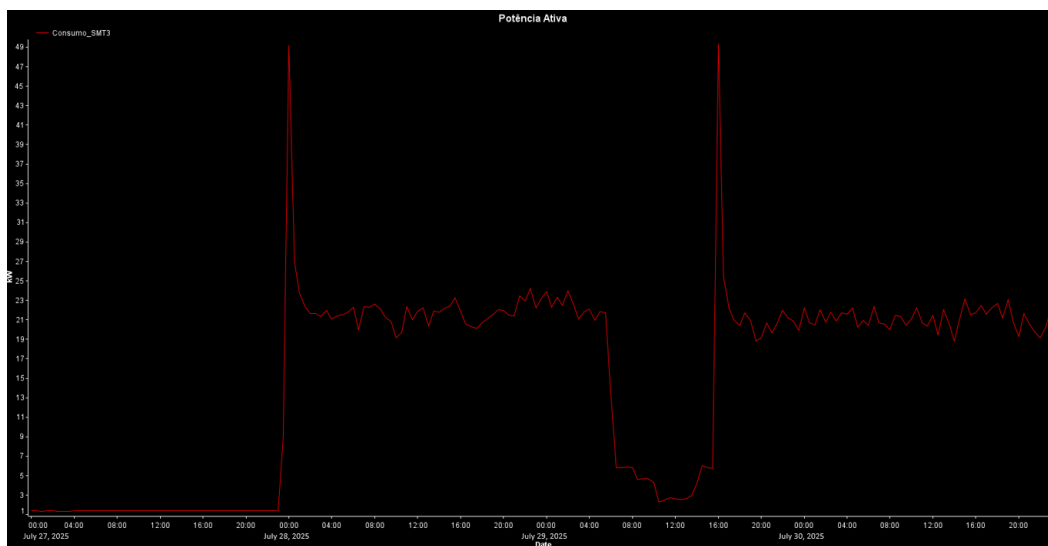


Figura 6.14: Consumo atípico na linha SMT3.

O gráfico permite verificar que a linha SMT3 inicia o seu funcionamento normal às 00 h de segunda-feira, após o período de inatividade durante o fim de semana. Neste momento, registou-se um pico de consumo energético, considerado expectável tendo em conta o contexto de arranque dos equipamentos, seguindo-se uma estabilização do consumo entre os 19 kW e os 23 kW. Era previsto que este padrão de consumo se mantivesse ao longo da semana. No entanto, no dia seguinte, observou-se uma queda acentuada no consumo da linha, seguida, mais tarde, por um novo pico com características semelhantes ao verificado durante a fase de inicialização. Face a este

desvio, procedeu-se à validação da informação junto do responsável da área, o qual confirmou que o aumento de consumo se deveu à realização de uma intervenção de manutenção previamente agendada na linha SMT3. Deste modo, a identificação e contextualização deste evento sublinham a relevância do sistema de monitorização na deteção e justificação de variações pontuais de consumo.

Produção UPAC2

Pouco tempo após a instalação da UPAC2 e a respetiva autorização para injeção no sistema de autoconsumo da fábrica, foi detetada, através do sistema de monitorização, a inexistência de produção elétrica durante períodos em que era expectável existir geração, conforme ilustrado na Figura 6.15.

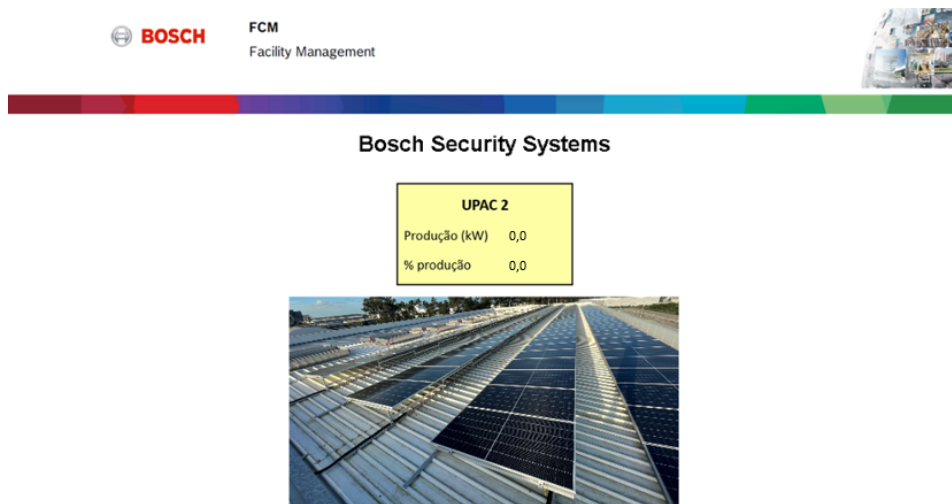


Figura 6.15: Inexistência de produção na UPAC2.

A análise subsequente identificou como causa provável uma falha técnica no sistema de proteção de interligação, que originava o deslastre da instalação de produção sem motivo aparente. O sistema de monitorização permitiu a deteção precoce destes eventos, possibilitando a sua sinalização atempada e o desencadear imediato de medidas corretivas junto das entidades competentes. Este tipo de resposta célere é crucial para evitar perdas associadas à inatividade da produção, preservando a rentabilidade do investimento e assegurando os benefícios previstos ao nível da redução dos custos energéticos.

Consumo ineficiente da rede de ar comprimido

O sistema de ar comprimido constitui um dos principais consumidores de energia elétrica do caso de estudo, representando entre 15% a 20% do consumo total da instalação. Dada a sua relevância, foi atribuída especial atenção à monitorização deste sistema, com o objetivo de identificar oportunidades para a sua otimização energética.

Em meados de agosto, ocorreu uma paragem total da produção durante uma semana, período no qual não se registou qualquer atividade fabril. Neste intervalo, como era expectável, verificou-se uma redução significativa tanto no caudal da rede de ar comprimido como no consumo energético associado aos compressores, conforme apresentado na Figura 6.16.

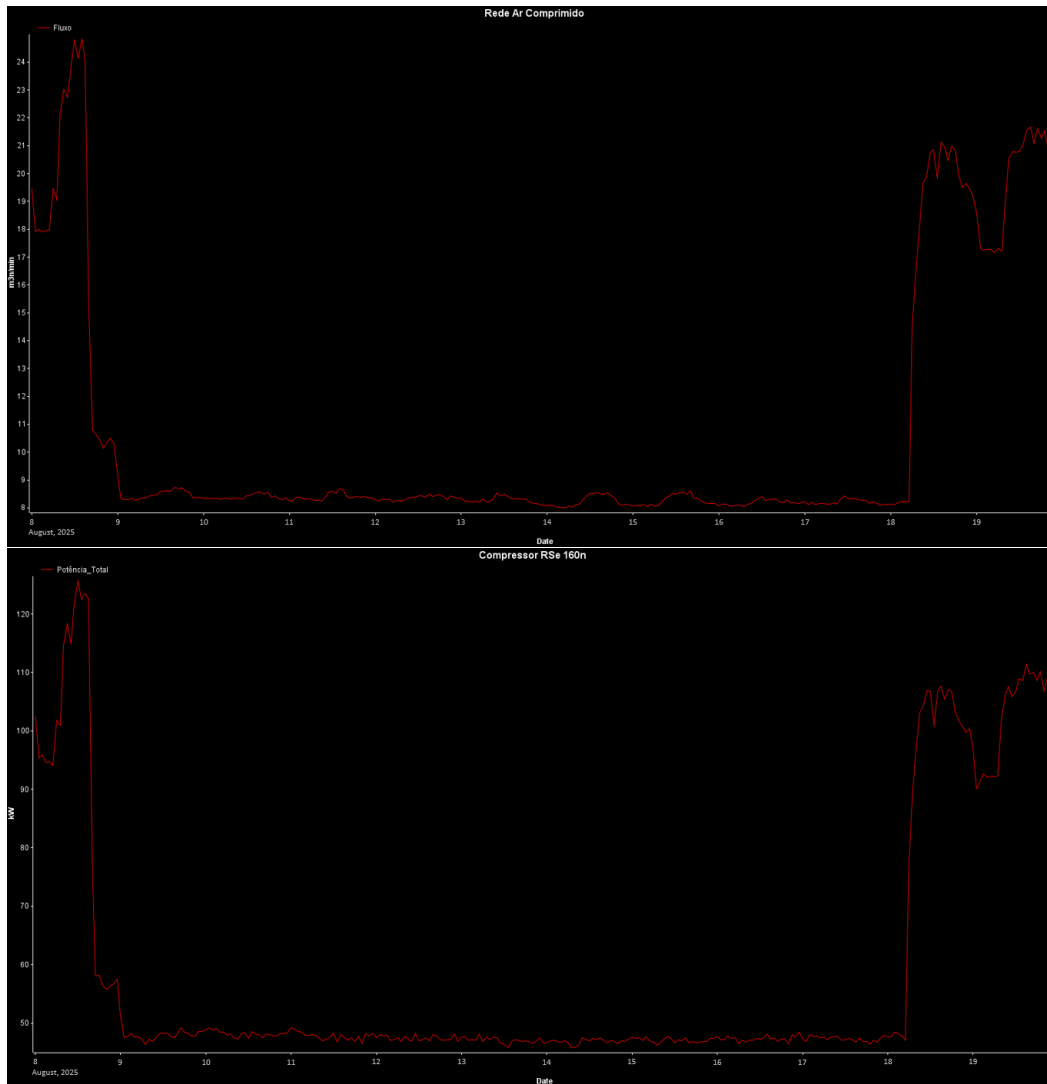


Figura 6.16: Consumo de ar comprimido na semana de paragem.

Os dados apresentados indicam uma redução do caudal de ar comprimido de aproximadamente $22 \text{ m}^3/\text{min}$ para $8 \text{ m}^3/\text{min}$, acompanhada de uma diminuição no consumo dos compressores de cerca de 110 kW para 50 kW . No entanto, seria expectável que, durante este período de inatividade, o consumo de ar comprimido fosse praticamente nulo, dado que não existia qualquer necessidade de produção. Esta discrepância pode ser explicada pela presença de fugas na rede de distribuição de ar comprimido e pelo processo de purga realizado nos dois secadores de adsorção

da marca Kaeser. Estes equipamentos são responsáveis pela secagem do ar comprimido destinado às linhas SMT, cujo processo implica a libertação periódica de ar, contribuindo para o consumo observado mesmo na ausência de produção.

De modo a quantificar o impacto específico dos secadores e das possíveis fugas na área SMT, realizou-se uma experiência durante um fim de semana sem produção. Neste teste, os dois secadores foram colocados em modo *standby* e a válvula de corte do coletor da área SMT foi encerrada durante um curto período de tempo. A Figura 6.17 representa os resultados obtidos relativamente ao caudal e ao consumo energético durante esse ensaio.

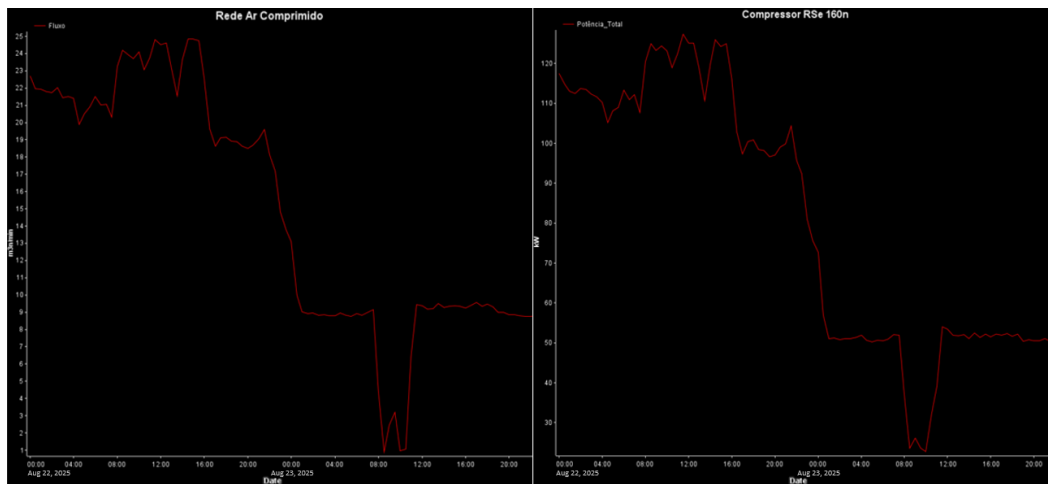


Figura 6.17: Consumo de ar comprimido com o *standby* dos secadores.

A análise dos gráficos permite verificar que, entre as 8 h e as 11 h do dia 23 de agosto, o caudal de ar comprimido desceu de $9 \text{ m}^3/\text{min}$ para $1 \text{ m}^3/\text{min}$, enquanto o consumo energético do compressor foi reduzido de 50 kW para 20 kW. Este diferencial evidencia o volume de ar desperdiçado pelas purgas dos secadores e as fugas localizadas na área SMT. O caudal residual restante é atribuído às fugas existentes nas restantes áreas de produção da fábrica.

Este cenário revela uma clara oportunidade de melhoria da eficiência energética do sistema de ar comprimido. Recomenda-se, por conseguinte, a implementação de um sistema automatizado que permita a comutação para o modo *standby* de, pelo menos, um dos secadores Kaeser. A ativação automática deste modo durante os fins de semana, ou sempre que não exista produção nas linhas SMT, permitiria eliminar consumos energéticos desnecessários e reduzir as perdas associadas a fugas de ar. Esta medida representa, portanto, um passo relevante no sentido de uma operação mais eficiente e sustentável do sistema de ar comprimido da unidade industrial.

Capítulo 7

Conclusões

O presente trabalho consistiu na conceção e implementação de um sistema de monitorização de recursos – energia elétrica, ar comprimido e azoto – nas instalações da Bosch Security Systems em Ovar. Este projeto surgiu da crescente necessidade de reforçar uma gestão mais eficiente dos consumos energéticos, promovendo práticas sustentáveis e alinhadas com os objetivos estratégicos da organização.

Durante a realização do trabalho, procedeu-se ao levantamento da infraestrutura existente, o que permitiu avaliar os equipamentos de medição e a rede de comunicação previamente instalada. A proposta inicial previa a instalação de 12 novos pontos de monitorização de energia elétrica, um ponto de ar comprimido e sete pontos de azoto. No entanto, face ao requisito orçamental definido, foi necessário adotar uma abordagem seletiva, priorizando a monitorização dos circuitos de energia elétrica, sem que tal comprometesse os objetivos essenciais do projeto. Contudo, os circuitos de ar comprimido e de azoto a monitorizar foram devidamente identificados e selecionados, bem como os dispositivos de medição necessários à sua implementação. Deste modo, ficam asseguradas as condições para a sua futura integração no sistema, logo que a disponibilidade orçamental o permita.

Para permitir a integração dos dispositivos já existentes com os novos equipamentos e, simultaneamente, assegurar a escalabilidade do sistema, foi realizada a reestruturação da infraestrutura de comunicação. A seleção dos novos equipamentos baseou-se na fiabilidade demonstrada pelos dispositivos existentes e na sua compatibilidade com o protocolo de comunicação Modbus.

Adicionalmente, o projeto apresentou uma alteração estratégica decorrente do processo de *carve-out* da unidade de Ovar, optando-se por manter o *software* PowerStudio, previamente implementado na fábrica, em detrimento da plataforma de energia da Bosch. Dado isto, procedeu-se à migração para uma versão mais completa, capaz de responder aos requisitos do projeto. Para complementar esta solução, foram desenvolvidos novos ecrãs e relatórios personalizados, que melhoraram significativamente a visualização e interpretação dos dados recolhidos. Esta abordagem permitiu disponibilizar informação clara, fiável e acessível, promovendo uma gestão mais fundamentada e eficaz.

Na fase de implementação surgiram desafios operacionais, uma vez que as atividades de instalação exigiam a interrupção do fornecimento de energia. Num ambiente fabril com operação contínua, estes tipos de intervenções limitam significativamente as janelas de atuação, o que contribuiu para alguns desvios no cronograma. Este facto reforça a importância de um planeamento detalhado e de uma supervisão eficaz das equipas envolvidas.

Na sequência da implementação do presente projeto, tornou-se possível a monitorização de um total de 75 equipamentos de medição através do *software* PowerStudio. Desses dispositivos, 74 estão dedicados ao controlo dos consumos de energia elétrica, enquanto o outro corresponde a um caudalímetro, responsável pela medição do consumo da rede de ar comprimido.

Para além do trabalho realizado, houve ainda a oportunidade de utilizar o sistema implementado na monitorização do caso de estudo, permitindo validar o seu desempenho em contexto real. Os resultados obtidos, nomeadamente a deteção de consumos atípicos nas linhas SMT, a identificação de desperdícios de ar comprimido durante períodos de paragem e o registo de falhas na produção de energia na nova UPAC, evidenciam a relevância e a utilidade da solução desenvolvida na identificação de anomalias operacionais. Assim, o sistema de monitorização revelou-se uma ferramenta valiosa de apoio à tomada de decisão, contribuindo de forma direta para a redução de custos operacionais e para o reforço das práticas de sustentabilidade da empresa.

Em suma, o sistema de monitorização concebido representa uma clara mais-valia para a unidade industrial, facultando dados essenciais para a tomada de decisões sustentadas. A monitorização contínua e centralizada dos recursos permite, não apenas a deteção precoce de falhas e desperdícios, mas também a promoção de uma cultura organizacional orientada para a eficiência energética e a sustentabilidade.

7.1 Propostas de Trabalho Futuro

Com a conclusão do presente projeto, considera-se que a evolução do sistema de monitorização desenvolvido constitui uma oportunidade relevante para reforçar

a gestão dos recursos da organização. A responsabilidade pela implementação das medidas propostas recairá sobre a equipa encarregue da continuidade do projeto, que deverá conduzir o processo de forma criteriosa, priorizando a seleção dos pontos de monitorização com maior impacto no consumo da fábrica.

Neste contexto, uma das perspetivas de desenvolvimento consiste na expansão da monitorização aos circuitos de ar comprimido e de azoto. Durante a execução deste trabalho foram identificados os circuitos a integrar, bem como definidos os equipamentos de medição adequados à sua implementação. A futura aquisição destes dispositivos permitirá completar a cobertura dos recursos inicialmente previstos, reforçando a abrangência e a eficácia do sistema.

Adicionalmente, recomenda-se a monitorização dos edifícios anteriormente afetos ao condomínio industrial, nomeadamente a cantina, a portaria e outras áreas, cujos consumos passaram recentemente a estar incluídos na fatura energética da empresa. Esta integração possibilitará uma análise mais detalhada por área funcional, contribuindo para uma imputação de custos mais rigorosa e para a identificação de potenciais ineficiências. De igual modo, sugere-se a extensão da monitorização aos principais circuitos de consumo do novo edifício OVR114, cuja atividade representa uma parcela expressiva do consumo energético da unidade fabril.

Para além da expansão da infraestrutura física, revela-se igualmente fundamental a evolução do sistema de análise e tratamento de dados. A disponibilização de relatórios mais detalhados e orientados para a avaliação contínua dos indicadores de desempenho energético, permitirá melhorar a capacidade de diagnóstico e de suporte à decisão. Complementarmente, aconselha-se a implementação da funcionalidade de envio automático de alertas por *e-mail*, em articulação com o departamento de IT. Esta medida visa assegurar a notificação imediata dos responsáveis das respetivas áreas sempre que se verifiquem desvios relevantes, anomalias ou falhas no sistema.

Em última análise, a consolidação da solução desenvolvida deverá permanecer em conformidade com os princípios da norma ISO 50001, promovendo uma abordagem sistemática, eficaz e sustentável à gestão da energia. Além disto, destaca-se a continuidade do compromisso da empresa com os SDG, garantindo a prossecução da responsabilidade ambiental, social e económica.

Referências

- [1] F. Yang, S. Ge, J. Liu, K. Yan, A. Gao, Y. Dong, M. Yang, and W. Zhang, “High-precision short-term industrial energy consumption forecasting via parallel-nn with adaptive universal decomposition,” *Expert Systems with Applications*, vol. 289, p. 128366, 9 2025. [Citado na página 1]
- [2] Y. Xin, H. Song, Z. Shen, and J. Wang, “Measurement of the integration level between the digital economy and industry and its impact on energy consumption,” *Energy Economics*, vol. 126, p. 106988, 10 2023. [Citado na página 1]
- [3] S. Hanifi, B. Alkali, G. Lindsay, and D. McGlinchey, “Optimizing energy and air consumption in smart manufacturing: An industrial internet of things-based monitoring and efficiency enhancement solution,” *Applied Sciences*, vol. 15, p. 3222, 3 2025. [Citado na página 1]
- [4] S. Mousavi, S. Kara, and B. Kornfeld, “Energy Efficiency of Compressed Air Systems,” *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 313–318, jan 2014. [Citado nas páginas 1 e 65]
- [5] Gasin, “Azoto (n_2).” Available at <https://www.gasin.com/gases/nitrogen#/>. Accessed: 20/03/2025. [Citado nas páginas 1 e 68]
- [6] H. Sequeira, P. Carreira, T. Goldschmidt, and P. Vorst, “Energy cloud: Real-time cloud-native energy management system to monitor and analyze energy consumption in multiple industrial sites,” in *Proceedings - 2014 IEEE/ACM 7th International Conference on Utility and Cloud Computing, UCC 2014*, pp. 529–534, IEEE, dec 2014. [Citado nas páginas 2 e 23]
- [7] P. Bandarra, M. T. Valdez, and A. Pereira, “Solutions for monitoring and analysing for energy consumption - Energy management systems,” in *Proceedings - 2016 51st International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2016*, vol. 2017-Janua, pp. 1–5, IEEE, sep 2016. [Citado nas páginas 2 e 24]

- [8] L. Barrera, “The 2030 Agenda for Sustainable Development in Engineering Education: A Criteria Statement Proposal for Graduate Attributes and Professional Competencies,” in *Proceedings - 8th International Symposium on Accreditation of Engineering and Computing Education, ICACIT 2022*, pp. 1–4, IEEE, nov 2022. [Citado na página 4]
- [9] UNDP, “Sustainable development goals | united nations development programme.” Available at <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>, 2021. Accessed: 25/10/2024. [Citado na página 4]
- [10] J. Wu, S. Guo, H. Huang, W. Liu, and Y. Xiang, “Information and communications technologies for sustainable development goals: State-of-the-art, needs and perspectives,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2389–2406, 2018. [Citado na página 4]
- [11] U. Nations, “Sdg.services - sdg world.” Available at <https://www.sdg.services/>. Accessed: 25/10/2024. [Citado nas páginas ix e 4]
- [12] I. Tronnebati and F. Jawab, “The similarities and differences between the green and sustainable supply chain management definitions and factors: A literature review,” in *2020 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management, LOGISTIQUA 2020*, pp. 1–6, IEEE, dec 2020. [Citado na página 5]
- [13] U. Nations, “Principles - sdg.services.” Available at <https://www.sdg.services/principles.html>. Accessed: 25/10/2024. [Citado na página 5]
- [14] J. Wu, S. Guo, H. Huang, W. Liu, and Y. Xiang, “Information and communications technologies for sustainable development goals: State-of-the-art, needs and perspectives,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2389–2406, 2018. [Citado na página 5]
- [15] U. Nations, “The five ps | sustainable development goals.” Available at <https://sdgs.punjab.gov.pk/the-five-ps>. Accessed: 25/10/2024. [Citado nas páginas ix e 5]
- [16] UNRIC, “Objetivo 9: Indústria, inovação e infraestruturas - nações unidas - onu portugal.” Available at <https://unric.org/pt/objetivo-9-industria-inovacao-e-infraestruturas-2/>. Accessed: 25/10/2024. [Citado na página 5]
- [17] Y. Li, “Industrialization as the driver of sustained prosperity,” tech. rep., UNIDO, 2021. [Citado na página 5]

- [18] R. Krut and K. Munis, “Sustainable Industrial Development,” in *Sustainable Measures*, pp. 426–437, Routledge, sep 2019. [Citado na página 5]
- [19] U. Nations, “Industry | department of economic and social affairs.” Available at <https://sdgs.un.org/topics/industry>, 2014. Accessed: 27/10/2024. [Citado na página 5]
- [20] Bosch, “Our history | bosch global.” Available at <https://www.bosch.com/company/our-history/>. Accessed: 20/10/2024. [Citado na página 6]
- [21] Bosch, “Company | bosch global.” Available at <https://www.bosch.com/company/>. Accessed: 20/10/2024. [Citado na página 6]
- [22] Bosch, “Responsible corporate governance | bosch global.” Available at <https://www.bosch.com/sustainability/responsibility/>. Accessed: 20/10/2024. [Citado na página 6]
- [23] Bosch, “Bosch sustainability report 2022.” Available at https://assets.bosch.com/media/global/sustainability/reporting_and_data/2022/bosch-sustainability-report-2022.pdf, 2022. Accessed: 20/10/2024. [Citado nas páginas ix e 6]
- [24] T. Akhtar, A. U. Rehman, M. Jamil, and S. O. Gilani, “Impact of an energy monitoring system on the energy efficiency of an automobile factory: A case study,” *Energies*, vol. 13, p. 2577, may 2020. [Citado nas páginas ix, 11, 12 e 13]
- [25] E. O’Driscoll, D. Og Cusack, and G. E. O’Donnell, “Implementation of energy metering systems in complex manufacturing facilities-A case study in a biomedical facility,” in *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 524–529, Elsevier, jan 2012. [Citado nas páginas ix, xiii, 13, 14 e 15]
- [26] F. Silvestro, A. Bagnasco, I. Lanza, S. Massucco, and A. Vinci, “Energy efficient policy and real time energy monitoring in a large hospital facility: A case study,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 35, pp. S221–S227, sep 2017. [Citado nas páginas ix, 15, 16 e 17]
- [27] R. Bayindir, E. Irmak, I. Colak, and A. Bektas, “Development of a real time energy monitoring platform,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, pp. 137–146, jan 2011. [Citado nas páginas ix, 17, 18 e 19]
- [28] F. Sánchez-Sutil and A. Cano-Ortega, “Design and Testing of a Power Analyzer Monitor and Programming Device in Industries with a LoRA LPWAN Network,” *Electronics*, vol. 10, p. 453, feb 2021. [Citado nas páginas ix, 19, 20, 21 e 22]

- [29] Z. Yue, X. Qing, Y. Gao, and Y. Wu, “Synthetic hydrochloric acid production and energy consumption process monitoring system,” in *Proceedings - 2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications, WARTIA 2014*, pp. 472–475, IEEE, sep 2014. [Citado na página 24]
- [30] Stability, “Energy-management-architecture - stability.” Available at <https://www.stability.co/energy-management-system-for-manufacturing-industry/energy-management-architecture/>. Accessed: 12/11/2024. [Citado nas páginas ix e 24]
- [31] T. Fiedler and P. M. Mircea, “Energy management systems according to the ISO 50001 standard - Challenges and benefits,” in *2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2012 - Proceedings*, pp. 1–4, IEEE, oct 2012. [Citado nas páginas 25 e 26]
- [32] F. Marimon and M. Casadesús, “Reasons to adopt ISO 50001 Energy Management System,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, p. 1740, sep 2017. [Citado nas páginas 25 e 26]
- [33] S. Henning, W. Hasselbring, H. Burmester, A. Möbius, and M. Wojcieszak, “Goals and measures for analyzing power consumption data in manufacturing enterprises,” *Journal of Data, Information and Management*, vol. 3, pp. 65–82, mar 2021. [Citado na página 25]
- [34] P. S. Bhase, G. M. Kolmare, and A. S. Deshpande, “Design & development of energy monitoring solution,” in *Proceeding - IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2016*, pp. 1222–1227, IEEE, apr 2017. [Citado na página 26]
- [35] F. Daryabar, A. Dehghantanha, N. I. Udzir, N. F. binti Mohd Sani, and S. bin Shamsuddin, “Towards secure model for scada systems,” in *Proceedings Title: 2012 International Conference on Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec)*, pp. 60–64, IEEE, 6 2012. [Citado na página 26]
- [36] S. U. Abdi, K. Iqbal, and J. Ahmed, “Development of pc-based scada training system,” in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, vol. 2016-May, pp. 1192–1197, IEEE, 3 2016. [Citado na página 26]
- [37] G. Yadav and K. Paul, “Architecture and security of scada systems: A review,” *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 34, p. 100433, 9 2021. [Citado na página 27]

-
- [38] M. Alanazi, A. Mahmood, and M. J. M. Chowdhury, “Scada vulnerabilities and attacks: A review of the state-of-the-art and open issues,” *Computers & Security*, vol. 125, p. 103028, 2 2023. [Citado nas páginas ix, 27 e 28]
- [39] A. Koushik and R. Bs, “4th generation scada implementation for automation,” *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 5, p. 629, 04 2016. [Citado na página 28]
- [40] K. Wang, D. Peng, L. Song, and H. Zhang, “Implementation of Modbus communication protocol based on ARM Coretx-M0,” in *Conference Proceedings - 2014 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2014*, pp. 69–73, IEEE, jul 2014. [Citado nas páginas 28, 29 e 30]
- [41] M. W. Ahmad, M. Mourshed, D. Mundow, M. Sisinni, and Y. Rezugui, “Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research,” *Energy and Buildings*, vol. 120, pp. 85–102, may 2016. [Citado nas páginas 28 e 29]
- [42] M. Rogerio Caldieri, J. Andre Bigheti, and E. Paciencia Godoy, “Implementation and Evaluation of Wireless Networked Control Systems using Modbus,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, pp. 206–212, feb 2017. [Citado nas páginas ix, 29, 30, 31, 33 e 34]
- [43] WAGO, “Modbus – protocol for industrial communication | wago.” Available at <https://www.wago.com/global/modbus>. Accessed: 27/11/2024. [Citado nas páginas ix e 29]
- [44] S. Tamboli, M. Rawale, R. Thoraiet, and S. Agashe, “Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using Siemens S7-1200 PLC for batch process,” in *2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*, pp. 258–263, IEEE, may 2015. [Citado nas páginas xiii, 29 e 31]
- [45] M. S, V. D, K. B R, P. K, and P. Gupta, “Smart Metering System,” in *2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, pp. 1–5, IEEE, nov 2021. [Citado nas páginas 29, 30, 39 e 43]
- [46] G. Cena, M. Cereia, I. Cibrario Bertolotti, and S. Scanzio, “A MODBUS extension for inexpensive distributed embedded systems,” in *2010 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems Proceedings*, pp. 251–260, IEEE, may 2010. [Citado nas páginas 29, 30 e 31]
- [47] G. Kunzel, M. A. Correa Ribeiro, and C. E. Pereira, “A tool for response time and schedulability analysis in modbus serial communications,” in *2014 12th*

- IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 446–451, IEEE, jul 2014. [Citado nas páginas ix, 29, 30, 32 e 33]
- [48] C. Urrea, C. Morales, and R. Muñoz, “Design and implementation of an error detection and correction method compatible with MODBUS-RTU by means of systematic codes,” *Measurement*, vol. 91, pp. 266–275, sep 2016. [Citado nas páginas ix e 30]
- [49] Y. Wang, Y. Wang, Z. Zhu, and Q. Wang, “Modbus TCP protocol in industrial control system Research on anomaly detection method,” in *2021 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT)*, pp. 391–395, IEEE, jul 2021. [Citado nas páginas 30, 31 e 34]
- [50] T.-S. Nguyen and T.-H. Huynh, “Design and implementation of modbus slave based on ARM platform and FreeRTOS environment,” in *2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, vol. 2016-Janua, pp. 462–467, IEEE, oct 2015. [Citado nas páginas 31 e 32]
- [51] C. Sun, K. Guo, Z. Xu, J. Ma, and D. Hu, “Design and Development of Modbus/MQTT Gateway for Industrial IoT Cloud Applications Using Raspberry Pi,” in *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 2267–2271, IEEE, nov 2019. [Citado na página 32]
- [52] Z. Zhang and Y. Yang, “Design of Remote Monitoring System for a Mechanical Equipment Based on Internet of Things,” in *2021 7th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC)*, pp. 54–59, IEEE, jul 2021. [Citado na página 32]
- [53] G. Yue, “Design of Intelligent Monitoring and Control System Based on Modbus,” in *2020 5th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP)*, pp. 149–153, IEEE, nov 2020. [Citado nas páginas ix, 32, 33 e 34]
- [54] J. N. Chhatrawala, N. Jasani, and V. Tilva, “FPGA based data acquisition with Modbus protocol,” in *2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, pp. 1251–1254, IEEE, apr 2016. [Citado na página 32]
- [55] B.-W. Park, S.-J. Park, and F.-S. Kang, “A Novel Communication Method Using PWM and Capture Function of DSP for Parallel Controlled Power Electronics Systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 68266–68280, 2022. [Citado nas páginas ix, 32 e 33]
- [56] K.-H. Tseng, C.-L. Hsieh, and Y.-F. Lien, “Solution of a newly built monitoring automation system in parallel to the original automation management

- system,” in *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, pp. 731–736, IEEE, may 2015. [Citado na página 33]
- [57] M. Raditya, P. A. Darwito, Z. N. Fahmi, A. Cikadiarta, A. P. Putra, and S. S. Wicaksana, “Multiple Linear Guide Actuator (LGA) Controller Based on Modbus RTU,” in *2021 3rd International Conference on Research and Academic Community Services (ICRACOS)*, pp. 209–213, IEEE, oct 2021. [Citado na página 33]
- [58] M. Faisal, A. A. Cardenas, and A. Wool, “Modeling Modbus TCP for intrusion detection,” in *2016 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, pp. 386–390, IEEE, oct 2016. [Citado nas páginas 34 e 35]
- [59] A. Shahzad, M. Lee, Y.-K. Lee, S. Kim, N. Xiong, J.-Y. Choi, and Y. Cho, “Real Time MODBUS Transmissions and Cryptography Security Designs and Enhancements of Protocol Sensitive Information,” *Symmetry*, vol. 7, pp. 1176–1210, jul 2015. [Citado na página 34]
- [60] NOVUS, “Artigo: Modelos cliente-servidor do modbus tcp e publish-subscribe do mqtt: quando utilizar cada um deles e quais suas vantagens e desvantagens? - notícias - novus produtos eletrônicos.” Available at <https://www.novus.com.br/pt/noticia/artigo-modelos-cliente-servidor-do-modbus-tcp-e-publish-subscribe-do-mqtt-quando-utilizar-cada-um-de>, 2019. Accessed: 27/11/2024. [Citado nas páginas 34 e 35]
- [61] Daviteq, “Modbus protocol and its applications in iot.” Available at <https://www.daviteq.com/blog/en/modbus-protocol-and-its-applications-in-iot/>, 2020. Accessed: 27/11/2024. [Citado nas páginas ix e 35]
- [62] Q. Bai, B. Jin, D. Wang, Y. Wang, and X. Liu, “Compact Modbus TCP/IP protocol for data acquisition systems based on limited hardware resources,” *Journal of Instrumentation*, vol. 13, pp. T04004–T04004, apr 2018. [Citado na página 35]
- [63] V. Maldonado, S. Gamboa, M. F. Trujillo, and A. Rodas, “Development of an Industrial Data Server for Modbus TCP Protocol,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1302, pp. 16–28, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. [Citado na página 35]
- [64] J. Sibson, “Using variable speed drives, servo motors and rs-485 communication in a solar tracking system for educational purposes,” Master’s thesis, Murdoch University, 2012. [Citado nas páginas ix, 35 e 37]
- [65] H. Bhojwani, G. K. Sain, and G. P. Sharma, “Computerized Fuse Auto Changeover System with RS485 Bus Reporting & Multiple IOT Cloud Connectivity

- Avenues,” in *2018 3rd Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON)*, pp. 1–5, IEEE, dec 2018. [Citado na página 36]
- [66] C. Sandhya, S. V. Tirunagari, S. Sahoo, and P. K. Yemula, “Extraction of Data from an RS-485 enabled Multi Function Meter for Building Monitoring Systems,” in *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1–6, IEEE, dec 2018. [Citado na página 36]
- [67] Xuemei Li, Bin Zhang, Feng Zhong, and XiaoGang Liu, “Research and implementation Of the temperature control system of heat treatment based on .NET and RS-485 bus,” in *2010 International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems*, pp. 341–345, IEEE, oct 2010. [Citado na página 36]
- [68] H.-j. Jia and Z.-h. Guo, “Research on the Technology of RS485 over Ethernet,” in *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, pp. 1–3, IEEE, nov 2010. [Citado nas páginas ix e 36]
- [69] A. J. C. A. Casais, “Monitorização e controlo de equipamentos de parques fotovoltaicos através da utilização de microcontroladores,” Master’s thesis, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2014. [Citado nas páginas ix, 36 e 37]
- [70] C. Net, “O que é ethernet, como funciona e para que serve?” Available at <https://www.controle.net/faq/ethernet--o-que-e--como-funciona-e-para-que-serve>. Accessed: 10/02/2025. [Citado nas páginas 37 e 38]
- [71] N. I. Aristova, “Ethernet in industrial automation: Overcoming obstacles,” *Automation and Remote Control*, vol. 77, pp. 881–894, 5 2016. [Citado nas páginas 37 e 38]
- [72] M. Rosić and U. Pešović, “Graphical representation of basic electrical power quantities measured with power logic pm5000 series,” in *International Scientific Conference “UNITECH 2022”*, pp. 83–87, UNITECH, 2022. [Citado nas páginas ix e 39]
- [73] F. Sánchez-Sutil and A. Cano-Ortega, “Design and testing of a power analyzer monitor and programming device in industries with a lora lpwan network,” *Electronics*, vol. 10, p. 453, 2 2021. [Citado na página 39]
- [74] E. O’Driscoll and G. E. O’Donnell, “Industrial power and energy metering – a state-of-the-art review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, pp. 53–64, 2 2013. [Citado na página 39]

- [75] J. Zheng, D. W. Gao, and L. Lin, “Smart meters in smart grid: An overview,” in *2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pp. 57–64, IEEE, 4 2013. [Citado na página 39]
- [76] D. N. Vukovic, R. Antic, V. Vujicic, and D. Pejic, “Application of the Protective Current Transformers in Measurement Systems for Energy Management Purposes,” in *IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*, pp. 1–4, IEEE, jul 2019. [Citado nas páginas xiii, 40, 41 e 42]
- [77] R. A. Bimantoro, A. Rahardjo, F. Husnayain, D. R. Aryani, and C. Hudayala, “Calibration of 100 A/50mA Instrument Current Transformer Energy Meter Using Bisection Method,” in *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, pp. 1–6, IEEE, jun 2019. [Citado na página 40]
- [78] J. Liu, Y. Zhu, Q. Xu, and Q. Huang, “Simulation analysis of power-frequency electromagnetic field interference on smart meters,” in *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, vol. 2016-Janua, pp. 1–5, IEEE, nov 2015. [Citado na página 40]
- [79] S. Electrical, “Current transformer (ct) – construction and working principle.” Available at https://studyelectrical.com/2018/09/current-transformer-ct-construction-working-operating-principle-advantages-uses.html?utm_content=cmp-true. Accessed: 12/01/2025. [Citado nas páginas ix, x, 40 e 41]
- [80] L. Peretto and R. Tinarelli, “Procedure for the assessment of metrological characteristics of window-type current transformers in three-phase power systems,” in *2014 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems Proceedings (AMPS)*, pp. 1–6, IEEE, sep 2014. [Citado nas páginas 40 e 41]
- [81] P. Babu, “Current transformers types:” Available at <https://electengmaterials.com/current-transformers-types/>. Accessed: 12/01/2025. [Citado nas páginas 40 e 41]
- [82] M. Subudhi and P. Joshi, “Open Secondary Testing of Window-Type Current Transformers,” Tech. Rep. May 2017, Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, NY (United States), feb 2018. [Citado na página 41]
- [83] D. Min, Z. Xiao, B. Sheng, and G. Shiya, “Design and implementation of the multi-channel rs485 iot gateway,” in *2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, pp. 366–370, IEEE, 5 2012. [Citado nas páginas x e 43]

- [84] L. Jiangsu Hongguang Instrument Factory Co., “sensores de medidor de fluxo - medidor de fluxo de água, medidor de fluxo de massa térmica, transmissor de nível.” Available at <https://www.hginstrument.com/pt/magnetic-flow-meter/flow-meter-sensors/>. Accessed: 16/01/2025. [Citado na página 44]
- [85] P. Mohindru, “Recent advancements in volumetric flow meter for industrial application,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 59, pp. 2149–2166, 11 2023. [Citado nas páginas x e 44]
- [86] P. Harris, S. Nolan, G. E. O’Donnell, and C. Meskell, *Optimising Compressed Air System Energy Efficiency - The Role of Flow Metering and Exergy Analysis*, pp. 129–134. Springer Singapore, 2013. [Citado nas páginas 44 e 45]
- [87] S. Kumar, “A review on client-server based applications and research opportunity,” *International Journal of Scientific Research*, vol. 10, pp. 33857–33862, 08 2019. [Citado na página 45]
- [88] IONOS, “What is a server? - ionos.” Available at <https://www.ionos.com/digitalguide/server/know-how/what-is-a-server-one-term-two-definitions/>. Accessed: 18/02/2025. [Citado na página 45]
- [89] S. M. Process, “Surface mount process - surface mount process.” Available at <https://www.surfacemountprocess.com/>. Accessed: 22/02/2025. [Citado nas páginas 48, 49, 50, 51, 52 e 53]
- [90] I. Electronics, “What is the smt line process and what are the precautions - ibe electronics.” Available at <https://www.pcbaaa.com/smt-line-process/>. Accessed: 22/02/2025. [Citado nas páginas 48, 50 e 52]
- [91] V. W. Fung and K. C. Yung, “An intelligent approach for improving printed circuit board assembly process performance in smart manufacturing,” *International Journal of Engineering Business Management*, vol. 12, p. 184797902094618, jan 2020. [Citado nas páginas x e 49]
- [92] A. Labs, “The smt process: What engineers should know | allion labs.” Available at https://www.allion.com/tech_surface_mount_tech/. Accessed: 22/02/2025. [Citado na página 50]
- [93] R. PCB, “Working of solder reflow oven: Achieving perfection - raypcb.” Available at <https://www.raypcb.com/solder-reflow-oven/>. Accessed: 22/02/2025. [Citado nas páginas 51 e 52]
- [94] S. M. Process, “Reflow soldering process - surface mount process.” Available at <https://www.surfacemountprocess.com/reflow-soldering-process.html>. Accessed: 22/02/2025. [Citado na página 52]

- [95] NextPCB, “Through hole (th) technology: Everything you need know.” Available at <https://www.nextpcb.com/blog/through-hole-technology>. Accessed: 24/02/2025. [Citado nas páginas 54 e 55]
- [96] K. PCB, “Smt element placement accuracy and machine function - kingford.” Available at <https://www.kingfordpcb.com/industry-news/3504.html>. Accessed: 24/02/2025. [Citado nas páginas x e 54]
- [97] T. M. Elektronik, “Que ferro de solda deve escolher? | distribuidor de componentes eletrônicos. loja online: Transfer multisort elektronik portugal.” Available at <https://www.tme.eu/pt/news/library-articles/page/21690/Que-ferro-de-solda-deve-escolher/>. Accessed: 24/02/2025. [Citado nas páginas x e 55]
- [98] Travis, “Soldagem por onda de pcb: técnicas, tipos e alternativas.” Available at <https://www.venture-mfg.com/pt/soldagem-por-onda-pcb/>. Accessed: 24/02/2025. [Citado nas páginas x e 55]
- [99] N. Abbas, “Demystifying soldering techniques: A comparison of wave soldering and reflow soldering.” Available at <https://www.wevolver.com/article/demystifying-soldering-techniques-a-comparison-of-wave-soldering-and-reflow-soldering>. Accessed: 24/02/2025. [Citado nas páginas x e 55]
- [100] M. Aamir, K. Ahmed Kalwar, and S. Mekhilef, “Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1395–1410, may 2016. [Citado nas páginas x e 58]
- [101] P. C. R. Gomes, “Irm-g-8783 90-160kw (125-200hp).” Available at <https://paulocrgomes.com.br/wp-content/uploads/2018/11/COMPRESSORES-DE-AR-PARA-PARAFUSOS-ROTATIVOS.pdf>. Accessed: 15/03/2025. [Citado nas páginas x e 65]
- [102] A. Liquide, “O que é o azoto líquido? qual é a utilização do azoto líquido na criogenia alimentar? | air liquide portugal - gases industriais.” Available at <https://pt.airliquide.com/solucoes/criogenia-alimentar/o-que-e-o-azoto-liquido-qual-e-utilizacao-do-azoto-liquido-na-criogenia-alimentar>. Accessed: 20/03/2025. [Citado na página 68]
- [103] A. Liquide, “Azoto | air liquide.” Available at <https://mygas.airliquide.pt/catalog-gas-products/nitrogen>. Accessed: 20/03/2025. [Citado nas páginas 68 e 69]
- [104] A. Liquide, “Soldadura por onda em atmosfera de azoto | air liquide portugal - gases industriais.” Available at <https://pt.airliquide.com/solucoes/p>

rocessos-de-gas-para-montagem-eletronica/soldadura-por-onda-em-atmosfera-de-azoto. Accessed: 20/03/2025. [Citado na página 69]

- [105] Circutor, “Software powerstudio | circutor.” Available at <https://circutor.com/pt-pt/produtos/software/software-local/product/W20100./>. Accessed: 25/05/2025. [Citado nas páginas xi e 92]

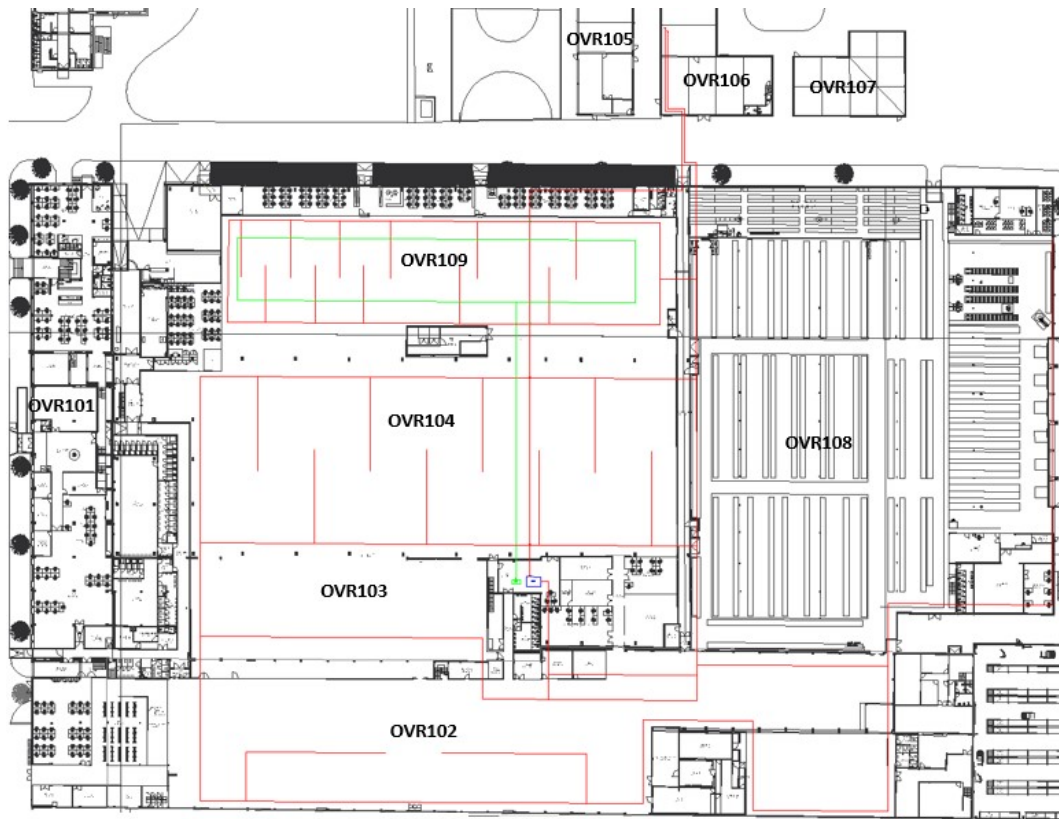
Anexo A

Parque Industrial

A.1 Layout da Fábrica



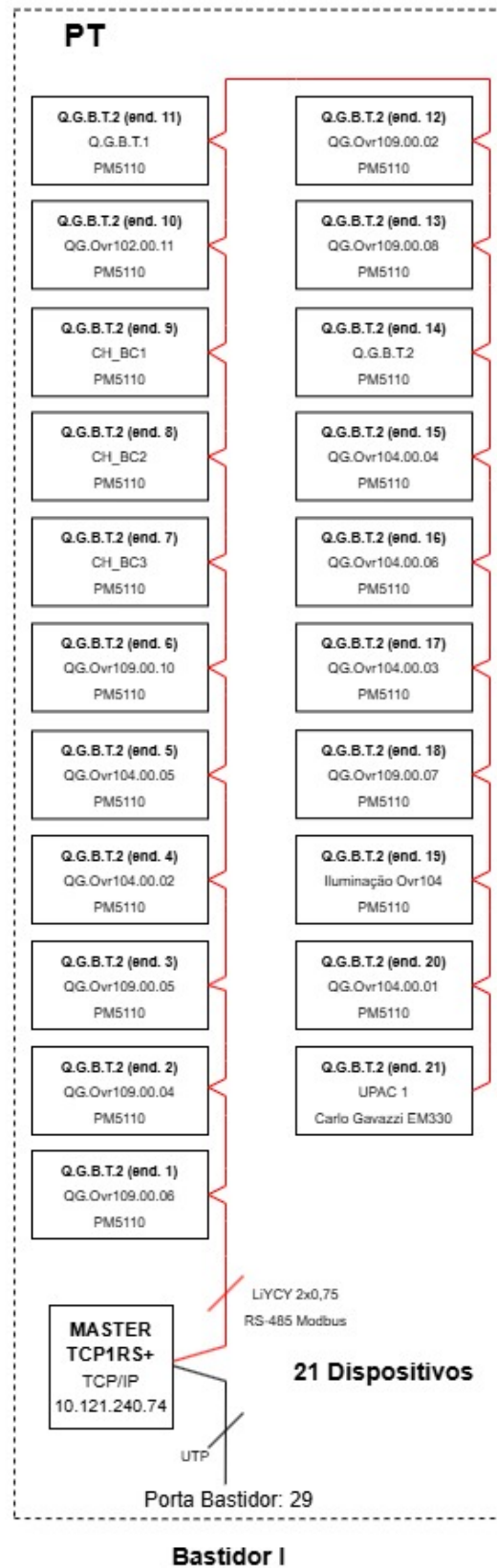
A.2 Sistema de Ar Comprimido



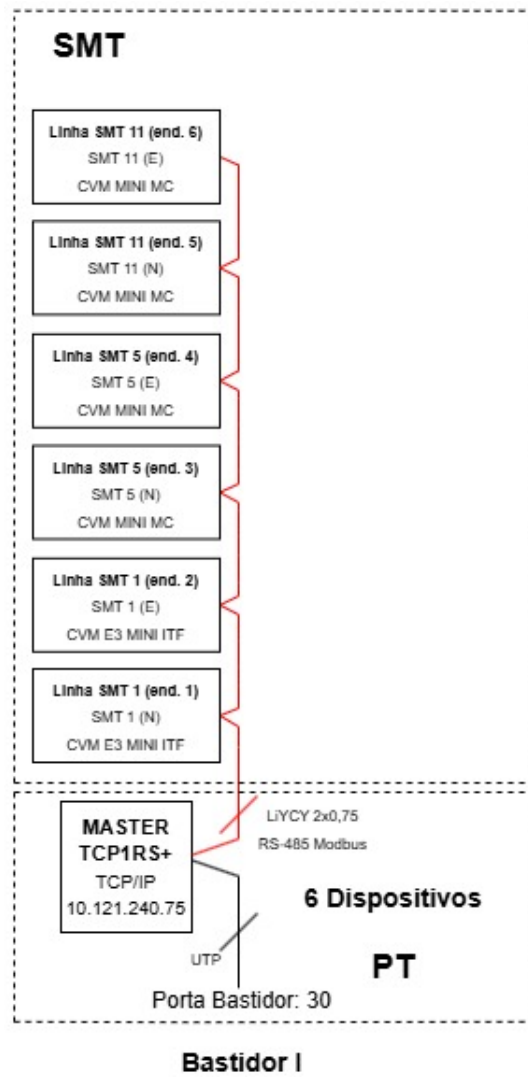
Anexo B

Barramentos da Rede de Comunicação

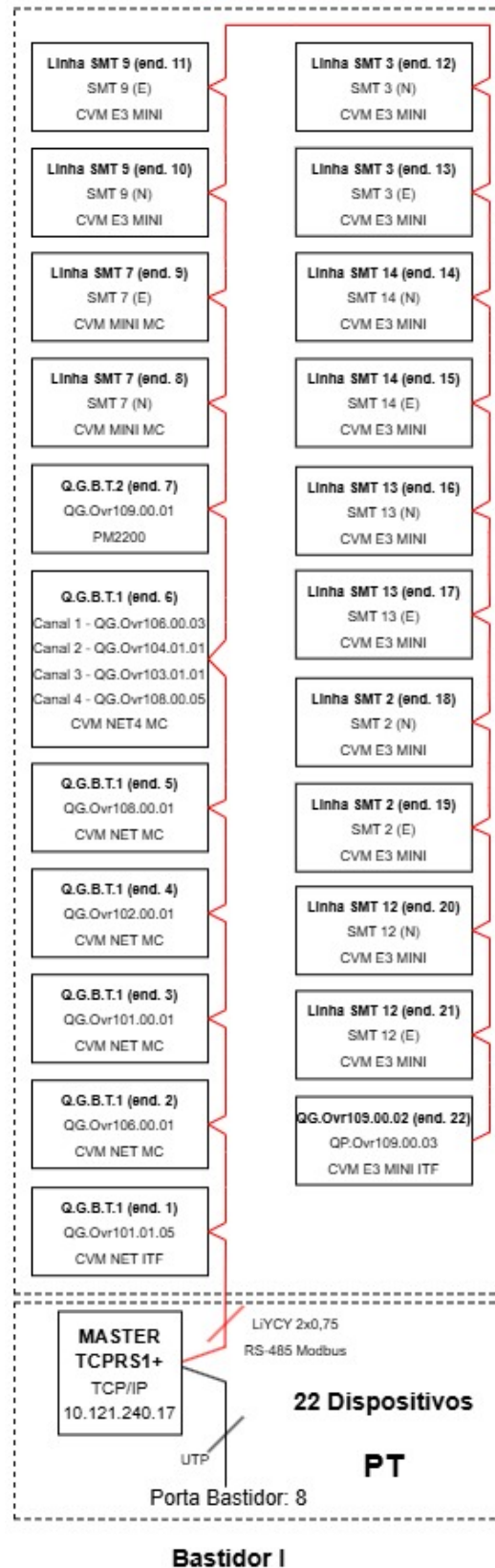
B.1 Barramento 1 - PT



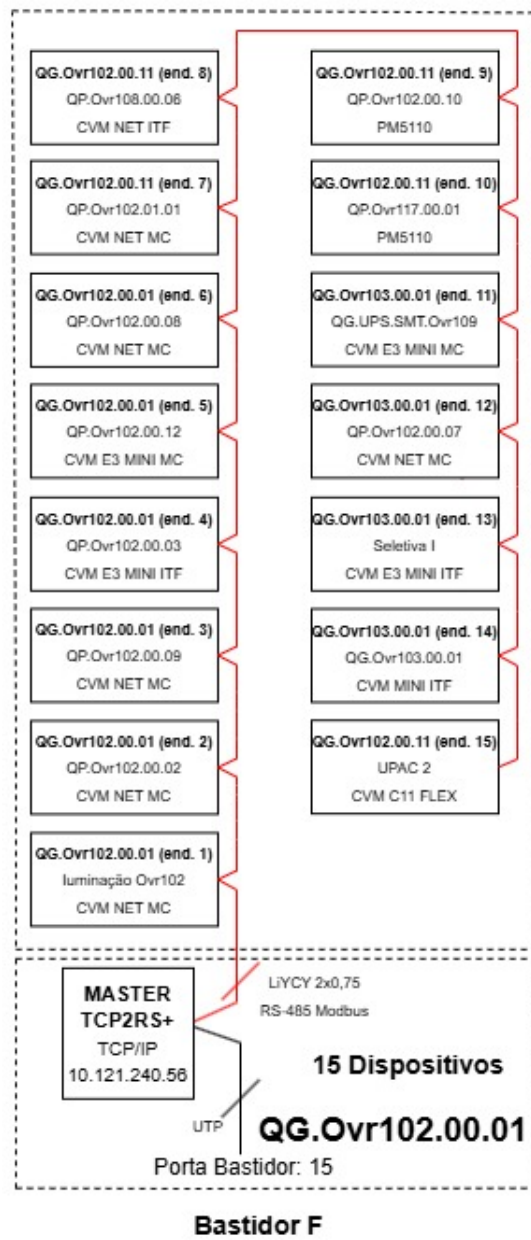
B.2 Barramento 2 - SMT



B.3 Barramento 3 - PT + SMT



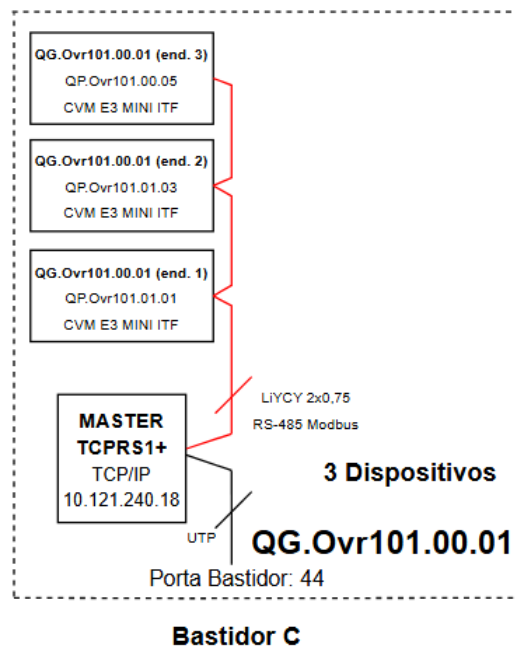
B.4 Barramento 4 - FAS + CSI



B.5 Barramento 5 - WHS + CAB



B.6 Barramento 6 - ESC

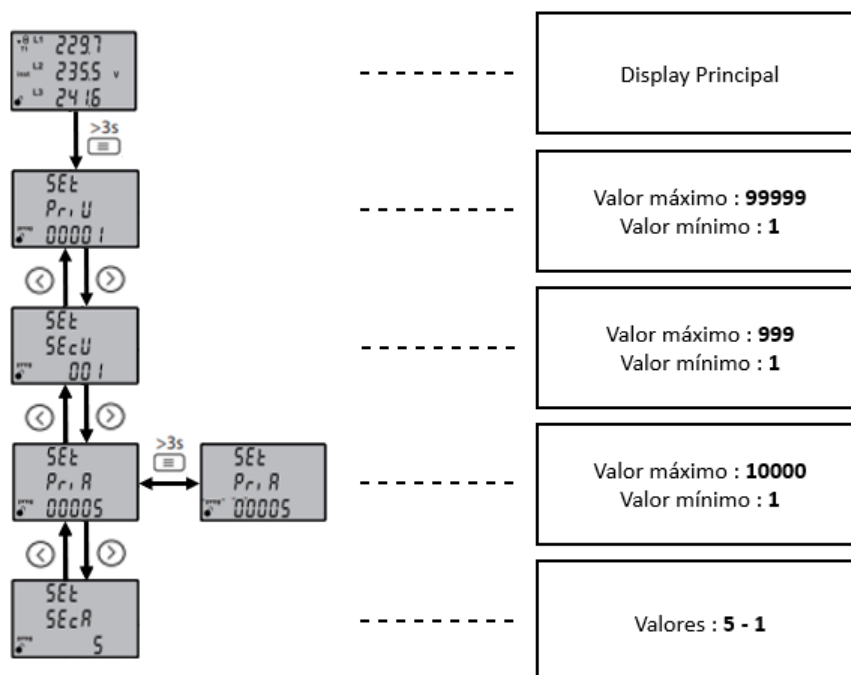


Anexo C

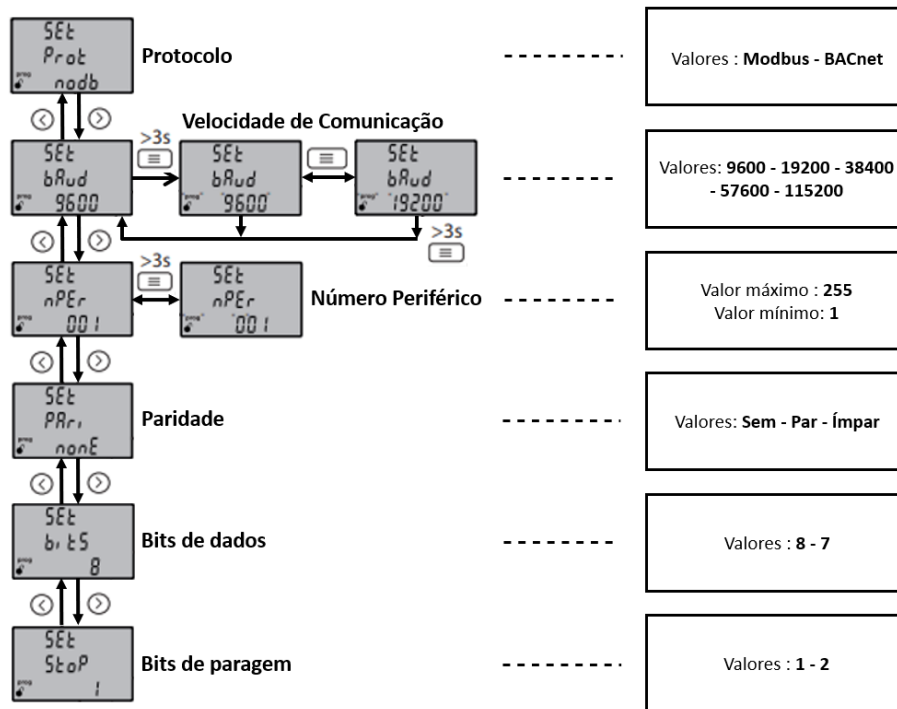
Parametrização de Equipamentos

C.1 Analisadores de Energia

C.1.1 Configuração da Relação de Transformação

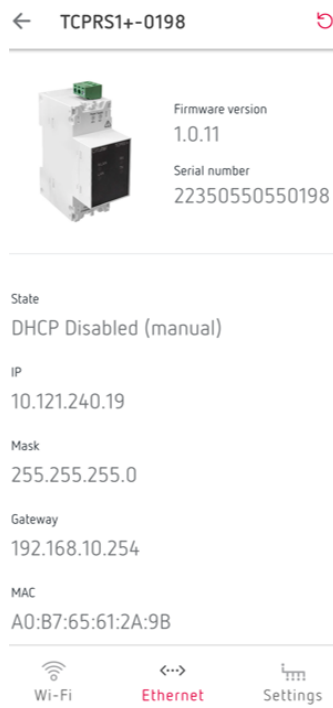


C.1.2 Configuração da Comunicação da rede Modbus



C.2 Conversores TCP/IP

C.2.1 Configuração da Rede Ethernet



C.2.2 Configuração dos Parâmetros de Comunicação da Rede Modbus

