



# Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E  
BIOLÓGICA

## **Análise Comparativa de Ciclos de Vida e Políticas de Manutenção em Energias Renováveis**

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e  
Gestão Industrial

Autor

**Danilo Gomes Vitória**

Orientadores

**Ana Carla Vicente Vieira**

**José Manuel Torres Farinha**

Coimbra, Dezembro 2024



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA



Dedico este trabalho ao progresso do desenvolvimento sustentável, contribuindo para o alcance das metas globais de redução do efeito estufa. O fomento ao conhecimento inspira e cativa a participação de cada indivíduo na transição energética, mostrando que, com tecnologias acessíveis e eficientes, é possível não apenas reduzir o impacto ambiental, mas também atender às demandas energéticas de forma responsável.

## **RESUMO**

As primeiras revoluções industriais, apesar de promoverem o progresso, também trouxeram preocupações ambientais, como o aumento do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, mudanças climáticas, e o aumento do nível do mar. Com metas globais de descarbonização até 2050, cresce a procura por soluções cada vez mais eficientes e sustentáveis. Este estudo investiga o papel das energias renováveis na transição energética, focando principalmente na eletrificação dos setores e na energia solar, destacando a contribuição do consumidor final para o desenvolvimento sustentável. A metodologia envolve a avaliação de desempenho e comparação dos modelos de ciclo de vida e políticas de manutenção aplicados aos sistemas de energias renováveis. Serão analisados indicadores como o valor de retorno, custos de posse, rendimentos financeiros, número falhas e tempo de reparação. Um caso de estudo foi desenvolvido para avaliar uma solução de baixo custo desenvolvida para produção de água quente sanitária (AQS), sendo uma alternativa aos painéis fotovoltaicos, especialmente no Brasil, onde os chuveiros elétricos representam grande parte do consumo elétrico de uma habitação. Aplicando os dados obtidos no estudo de caso em uma análise integrada com modelos matemáticos de ciclo de vida e políticas de manutenção, foi possível obter uma visão abrangente sobre a durabilidade e a eficiência desse projeto, demonstrando também que uma tomada de decisão deve ser feita com base em uma visão holística analisando os indicadores como um todo. Os resultados mostraram que o sistema solar térmico elaborado oferece um retorno económico atraente e um bom desempenho, representando uma opção de menor custo em comparação com as tecnologias solares usuais, reforçando também que, além das políticas globais de descarbonização, as ações locais e individuais são fundamentais para um futuro sustentável.

**Palavras-Chave:** Energias Renováveis, Ciclo de vida, Manutenção, Eletrificação, Água Quente Sanitária (AQS)

## **ABSTRACT**

The first industrial revolutions, while promoting progress, also brought environmental concerns such as increased atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), climate change, and rising sea levels. With global decarbonization targets set for 2050, the demand for increasingly efficient and sustainable solutions is growing. This study investigates the role of renewable energy in the energy transition, focusing primarily on sector electrification and solar energy, highlighting the end consumer's contribution to sustainable development. The methodology involves evaluating performance and comparing life cycle models and maintenance policies applied to renewable energy systems. Key indicators such as return value, ownership costs, financial returns, failure rates, and repair times are analyzed. A case study was developed to evaluate a low-cost solution for domestic hot water (DHW) production as an alternative to photovoltaic panels, especially in Brazil, where electric showers account for a large portion of household electricity consumption. Applying data from the case study in an integrated analysis using life cycle models and maintenance policies provided a comprehensive view of this project's durability and efficiency, showing that decision-making should consider a holistic perspective by analyzing all indicators as a whole. The results showed that the designed solar thermal system offers an attractive economic return and good performance, representing a lower-cost option compared to conventional solar technologies. It also reinforces that, beyond global decarbonization policies, local and individual actions are essential for a sustainable future.

**Keywords:** Renewable Energy, Life Cycle, Maintenance, Electrification, Domestic Hot Water (DHW)

## AGRADECIMENTOS

Como bem afirmou o escritor Miguel Torga, no Diário I, “Vida! Vida conquistada em luta, como a do rebento do milho que empurra, empurra, e consegue levantar o torrão e ver o sol”. A persistência diante das adversidades, é o caminho necessário para alcançar um objetivo, e de igual modo a conclusão desta dissertação é o fruto de um processo que, embora desafiador, foi também necessário para uma experiência de grande aprendizado e crescimento pessoal.

Neste momento venho expressar a minha sincera gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória. Cada passo, foi dado com apoio de quem esteve ao meu lado e acompanhou minha jornada.

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, saúde e sabedoria, que foram essenciais para que eu pudesse percorrer este caminho. Sem Sua permissão nada disso seria possível.

Agradeço à minha família, que sempre ofereceu o melhor para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Reconheço que muitos sacrifícios foram feitos para que tivesse condições de estudar e me desenvolver, o suporte de vocês foi crucial para que eu conseguisse chegar até aqui, sou profundamente grato por tudo.

Agradeço aos meus orientadores, Ana Carla Vicente Vieira e José Manuel Torres Farinha, por todo suporte durante o desenvolvimento da pesquisa. As conversas e conselhos foram essenciais para a conclusão desse trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos que, com palavras de motivação, apoio e *networking*, contribuíram para que eu seguisse firme em minha jornada. Este trabalho além do reflexo de muita dedicação e perseverança, é também o resultado de todas as pequenas ajudas que recebi ao longo do caminho.

Também agradeço a Portugal por ter me acolhido nos últimos 5 anos e proporcionado experiências nunca imaginadas.

E agradeço a Coimbra, cidade dos doutores, dos amores e da saudade, por cada vivência como estudante. Aqui, muito aprendi.

## ÍNDICE

Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Agradecimentos .....	iv
Índice.....	v
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tabelas .....	x
Índice de Gráficos .....	xii
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos.....	xiii
1 Introdução .....	1
1.1 Motivação e Contexto.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Estrutura.....	2
2 Enquadramento Teórico .....	3
2.1 Transformações Energéticas: Do Vapor à Eletricidade .....	3
2.2 Eletrificação dos Setores.....	4
2.3 Aquecimento Global e a Urgência da Descarbonização .....	9
2.4 Desenvolvimento Sustentável: Objetivos Globais e Compromissos com o Futuro.....	13
2.5 Energias Renováveis: Tecnologias e Potencial.....	15
2.5.1 Energia Solar.....	16
2.5.2 Energia Eólica .....	18
2.5.3 Energia Hídrica .....	19
2.5.4 Energia Geotérmica.....	21
2.5.5 Energia dos Oceanos.....	22
2.6 Ciclo de Vida: Conceitos, Modelos e Aplicações.....	24
2.6.1 <i>Uniform Annual Income</i> (UAI).....	30
2.6.2 <i>Minimization of Total Average Cost Method</i> (MTAC) .....	33
2.6.3 <i>Life Cycle Investment</i> (LCI) .....	38
2.6.4 <i>Life Cycle of Physical Assets with Recovery</i> (LCR) .....	44
2.7 Políticas de Manutenção e Gestão de Desempenho .....	48
2.7.1 Contexto Histórico .....	49
2.7.2 Normas aplicadas a manutenção .....	55
2.7.3 MTBF - <i>Mean Time Between Failures</i> .....	64
2.7.4 MTTR - <i>Mean Time To Repair</i> .....	65

2.7.5	MTTF - <i>Mean Time To Fail</i> .....	66
2.7.6	Disponibilidade Física das Máquinas .....	68
2.7.7	Custo de Manutenção por Faturação - CMF.....	68
2.7.8	Custo de Manutenção por Valor de Reposição - CMVR.....	69
2.8	Metodologia .....	74
2.8.1	Energia Solar Fotovoltaica .....	75
2.8.2	Energia Solar Térmica .....	77
3	Materiais e Métodos .....	82
4	Estudo de Caso .....	86
4.1	Implementação do Sistema em Análise.....	86
4.2	Resultados e Discussões .....	104
4.2.2	<i>Uniform Annual Income</i> (UAI).....	106
4.2.3	<i>Minimization of Total Average Cost Method</i> (MTAC) .....	108
4.2.4	<i>Life Cycle Investment</i> (LCI) .....	109
4.2.5	<i>Life Cycle of Physical Assets with Recovery</i> (LCR) .....	111
4.2.6	Indicadores de Desempenho da Manutenção .....	112
5	Conclusão.....	116
6	Referências Bibliográficas.....	118
	Anexo 1 - Proposta comercial para instalação de painéis fotovoltaicos.....	124
	Anexo 2 - Proposta comercial para instalação sistema solar térmico.....	125
	Anexo 3 - Página de venda do disco coletor.....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de processos com as transições energéticas da máquina a vapor... 3	3
Figura 2 - Primeira usina de produção de energia elétrica. .... 4	4
Figura 3 - Transformações energéticas para produção de eletricidade. .... 5	5
Figura 4 - Consumo de eletricidade, mundo, 1990-2021. .... 7	7
Figura 5 - Fornecimento total de energia por fonte, 1990-2021. .... 8	8
Figura 6 - Percentagem da produção de eletricidade por fonte, 1990-2021. .... 8	8
Figura 7 - Previsão de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis. .... 9	9
Figura 8 - Aumento da concentração de CO <sub>2</sub> de 1958 – 2017. .... 10	10
Figura 9 - Aumento na temperatura média do ar na superfície terrestre de 1880-2009. ..... 10	10
Figura 10 - Apresentação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) sobre acontecimentos de calor extremo em 2023. .... 12	12
Figura 11 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. .... 14	14
Figura 12 - Produção de eletricidade renovável por fonte (não combustível)1990- 2021. .... 15	15
Figura 13 - Painéis Solares Fotovoltaicos para produção de energia elétrica. .... 16	16
Figura 14 - Painéis solares térmicos para produção de água quente. .... 16	16
Figura 15 - Irradiação solar horizontal global na Terra. .... 17	17
Figura 16 - Parque solar Bhadla em Rajasthan, Índia. .... 17	17
Figura 17 - Aerogeradores ( <i>on-shore</i> ). .... 18	18
Figura 18 - Potencial de densidade de energia eólica em 2019. .... 18	18
Figura 19 - Parque Eólico de Gansu, China. .... 19	19
Figura 20 - Produção hidrelétrica mundial, 2023. .... 20	20
Figura 21 - Usina das Três Gargantas, China. .... 21	21
Figura 22 - Atividade geotérmica no mundo ..... 21	21
Figura 23 - Central Geotérmica do Pico Vermelho. .... 22	22
Figura 24 - Energia cinética e potencial por meio do movimento marítimo. .... 23	23
Figura 25 - Usina de MeyGen. .... 23	23
Figura 26 - Usina de ondas do Porto do Pecém. .... 24	24
Figura 27 - Abrangência da PAS 55, face aos ativos de uma organização. .... 26	26
Figura 28 - A manutenção ao longo da história. .... 49	49

Figura 29 - Exemplo da alteração nas características físicas de uma mesma máquina ao longo do tempo: a) Máquina de costura em seus primórdios, robustas, construídas em metal; b) Máquina atual mais tecnológica e menos robusta. ....	50
Figura 30 - Processo de certificação ISO em Portugal. ....	56
Figura 31 - Certificação ISSO 9001 exposta em produtos Continente©. ....	57
Figura 32 - Marcação CE de conformidade com as normas europeias. ....	58
Figura 33 - Hierarquia da manutenção segundo a norma NP 13306. ....	58
Figura 34 - Distinção de metodologias programadas e não programadas. ....	60
Figura 35 - Interface do software IBM Maximo. ....	71
Figura 36 - Interface do software Primavera. ....	72
Figura 37 - Elementos de um sistema fotovoltaico. ....	76
Figura 38 - Composição dos painéis fotovoltaicos. ....	76
Figura 39 - Solar Térmico patenteado por Clarence Kemp. ....	77
Figura 40 - Circulação de água pelo método termosifão. ....	78
Figura 41 - Circulação de fluido com intervenção da bomba. ....	78
Figura 42 - Coletor do tipo Placa Plana. ....	79
Figura 43 - Coletor do tipo tubo de vácuo. ....	80
Figura 44 - Coletor do tipo concentrador. ....	80
Figura 45 - Coletor para piscina. ....	81
Figura 46 - Produção de AQS através da eletrificação. ....	82
Figura 47 - Chuveiro elétrico. ....	83
Figura 48 - Solar térmico construído na habitação. ....	86
Figura 49 - Disco coletor do tipo aquecimento de piscinas. ....	87
Figura 50 - Estrutura que suporta a caixa d'água. ....	90
Figura 51 - Modelagem com cotas em milímetro da estrutura da caixa d'água. ....	91
Figura 52 - Modelo de suporte inclinado em madeira. ....	92
Figura 53 - Analogia entre uma espiral e círculos concêntricos: a) Espiral de Arquimedes; b) Segundo quadrante em zoom, simbolizando em círculos concêntricos. ....	93
Figura 54 - Termostato modelo XH-W3001. ....	95
Figura 55 - Bomba hidráulica 34W da marca EMICOL. ....	95
Figura 56 - Mosaico de fotos com a construção do suporte em madeira. ....	96
Figura 57 - Bomba hidráulica 34W da marca EMICOL. ....	96

Figura 58 - Vista lateral do reservatório com a tubagem de água fria e quente.....	97
Figura 59 - Espirais de mangueira, modeladas com as condições calculadas. ....	97
Figura 60 - Elementos do circuito hidráulico: a) Simulação de funcionamento antes da fixação na estrutura b) Fixação estratégica da bomba circuladora e termostato.	98
Figura 61 - Fixação do projeto a estrutura da caixa d'água a) Conjunto preso aos ganchos; b) Gancho de aço preso ao pilar da estrutura. ....	98
Figura 62 - Ligação do circuito hidráulico a caixa d'água: a) Flange para conexão de tubagens. b) Ligação das mangueiras as flanges. ....	99
Figura 63 - Sonda medidora de temperatura.....	99
Figura 64 - Mangueira para captação de água superficial. ....	100
Figura 65 - Variáveis e equação para o cálculo de volume de um cilindro.....	100
Figura 66 - Gráfico de incidência solar ao longo do dia.....	101
Figura 67 - Áudio gravado para detetar variações de ruído. ....	101
Figura 68 - Temperatura da água superficial no reservatório. ....	102
Figura 69 - Vista lateral do reservatório em cotas.....	102
Figura 70 - Temperatura da água aquecida apenas pela resistência elétrica do chuveiro.....	103

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - 20 maiores conquistas da engenharia no século XX.....	6
Tabela 2 - Consumo médio energético dos eletrodomésticos.....	6
Tabela 3 - Produção de eletricidade renovável por fonte (não combustível), 2021. .....	16
Tabela 4 - Minimização do Custo Médio Total.....	34
Tabela 5 - <i>Payback</i> .....	37
Tabela 6 - Dados do problema.....	40
Tabela 7 - ROI anual.....	41
Tabela 8 - ROI anual aplicado a um cenário de aumento de custos.....	43
Tabela 9 - Dados referentes aos gastos por substituição e reaproveitamento.....	46
Tabela 10 - Evolução dos processos de manutenção associados as revoluções industriais.....	55
Tabela 11 - Exemplo de rotinas de manutenção preventiva semestrais aplicadas ao solar térmico.....	62
Tabela 12 - Tempo de operação das lâmpadas.....	67
Tabela 13 - Dados de desempenho da UTA.....	72
Tabela 14 - Indicadores de desempenho para cada mês.....	73
Tabela 15 - Proposta Comercial Solar Térmico.....	84
Tabela 16 - Proposta Comercial Fotovoltaico.....	84
Tabela 17 - Aspectos positivos e negativos da ideia 1.....	87
Tabela 18 - Aspectos positivos e negativos da ideia 2.....	88
Tabela 19 - Aspectos positivos e negativos da ideia 3.....	89
Tabela 20 - Aspectos positivos e negativos da ideia 4.....	89
Tabela 21 - Custos de produtos encomendados para elaboração do projeto.....	96
Tabela 22 - Registro das atividades de manutenção previstas em 10 anos.....	105
Tabela 23 - Cálculo dos custos operacionais nos próximos 10 anos.....	106
Tabela 24 - Cálculo anual do MTAC.....	109
Tabela 25 - Cálculo anual dos custos de manutenção, operacionais e retorno financeiro.....	110
Tabela 26 - ROI anual acumulado.....	111
Tabela 27 - Tempo de operação do ativo e tempo de execução de manutenção..	112

Tabela 28 - Cálculo anual do MTBF e MTTR acumulados..... 113

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Custo Médio Total ao longo da vida útil de 20 anos.....	36
Gráfico 2 - Custo Medio Total ampliado a partir do ano 10.....	36
Gráfico 3 - Custo Acumulado vs. Retorno Financeiro Acumulado.....	38
Gráfico 4 - ROI anual para um período de 10 anos.....	42
Gráfico 5 - ROI anual para o mesmo período em um cenário de aumento de custos. .....	43
Gráfico 6 - Comparação dos dois cenários de ROI por meio da sobreposição gráfica. .....	44
Gráfico 7 - Cartas de controlo para um período de 6 meses: a) MTTR; b) MTBF. .....	73
Gráfico 8 - ROI anual acumulado.....	111
Gráfico 9 - MTBF Acumulado.....	113
Gráfico 10 - MTBF Acumulado.....	114

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS**

°C	Celsius
€	Euro
5S	<i>Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke</i>
a.C.	Antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APMI	Associação Portuguesa de Manutenção Industrial
APREN	Associação de Energias Renováveis
AQS	Água Quente Sanitária
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
BSI	<i>British Standards Institute</i>
ca.	<i>Circa</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CE	Conformidade Europeia
CEE	Comunidade Económica Europeia
CEN	Comité Europeu de Normalização
cm	Centímetro
CMF	Custo de Manutenção por Faturação
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i>
CMT	Custo Médio Total
CMVR	Custo de Manutenção por Valor de Reposição
CO <sup>2</sup>	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CQNUAC	Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas
EDP	Energias de Portugal
EE	Energia Elétrica
EEE	Espaço Económico Europeu
EJ	Exajoule
EN	<i>European Norms</i>
Eq.	Equação
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
IA	Inteligência Artificial
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IBM	<i>International Business Machines</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPAC	Instituto Português de Acreditação
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

JIT	<i>Just-In-Time</i>
KPIs	<i>Key Performance Indicators</i>
kW	Quilowatt
LCI	<i>Life Cycle Investment</i>
LCR	<i>Life Cycle of Physical Assets with Recovery</i>
m	Metro
MTAC	<i>Minimization of Total Average Cost Method</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	<i>Mean Time To Fail</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
MW	Megawatt
MWT	<i>Mean Waiting Time</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDC	<i>Nationally Determined Contributions</i>
NP	Norma Portuguesa
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milénio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PAS 55	<i>Publicly Available Specification 55</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PLC	<i>Programable Logic Controller</i>
PPM	Partes Por Milhão
R\$	Reais
RA	Realidade Aumentada
RCM	<i>Reliability Centred Maintenance</i>
ROI	<i>Return on investment</i>
SAP	<i>System Applications and Products in Data Processing</i>
SGA	Sistemas de Gestão Ambiental
SGM	Sistema de Gestão da Manutenção
SMIT	Sistema Modular Integrado de Terologia
TIM	Técnicos de Instalação e Manutenção
TIR	Taxa Interna de Retorno
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TRM	Técnicos Responsáveis pela Manutenção
TWh	Terawatt hora
UAI	<i>Uniform Annual Income</i>
UE	União Europeia
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
VAL	Valor Atual Líquido
VF	Valor Futuro
VP	Valor Presente

VPL	Valor Presente Líquido
VR	Valor Residual
W	Watt
Wp	Watt-pico



## **1 INTRODUÇÃO**

A preocupação com o impacto ambiental e a necessidade de transição para fontes de energia mais limpas, impulsionaram o desenvolvimento sustentável com o surgimento de tecnologias renováveis. Diferentemente dos parques eólicos, usinas hidrelétricas e centrais geotérmicas, que demandam grandes investimentos espaço e gestão, os sistemas solares, especialmente os fotovoltaicos e térmicos, tornam-se essenciais na democratização da energia, permitindo que indivíduos e comunidades adotem práticas de produção descentralizada. Esses sistemas tornam-se relevantes em regiões onde a infraestrutura tradicional de energia é limitada ou os preços são elevados.

Para auxiliar a tomada de decisões e maximizar os benefícios e eficiência desses sistemas é essencial a adoção de políticas de manutenção bem como análises do ciclo de vida. O trabalho explora alternativas acessíveis para a produção de água quente sanitária, promovendo a eficiência energética e destacando a relevância de decisões baseadas em indicadores integrados.

### **1.1 Motivação e Contexto**

O desenvolvimento humano sempre esteve ligado aos avanços energéticos, mas com o aumento das demandas globais e as metas de descarbonização até 2050, que visam mitigar os efeitos das mudanças climáticas, como o aquecimento global e a elevação do nível do mar, a transição para fontes renováveis torna-se essencial.

Para o cliente final, os métodos comumente aplicados nas residências são a energia solar térmica, para produção de água quente sanitária (AQS), e a fotovoltaica, que produz eletricidade. Ambas as soluções possuem preço elevado, o que vai de contra o sétimo objetivo do desenvolvimento sustentável de assegurar que as pessoas tenham acesso a energia acessível, fiável, sustentável e moderna.

Em países como o Brasil por exemplo, o consumo residencial é fortemente impactado por equipamentos de alto gasto energético, como o chuveiro elétrico, responsável por aquecer a água da maior parte das residências brasileiras.

Assim, esse estudo busca responder a necessidade do consumo elétrico, propondo um sistema solar térmico de fabrico artesanal, com o objetivo de oferecer uma alternativa prática e econômica para o aquecimento de água. A proposta visa promover uma maior independência energética e estimular um modelo de consumo mais consciente. Ao integrar a análise do ciclo de vida e das políticas de manutenção, o trabalho avalia o desempenho, a durabilidade e o custo-benefício do sistema solar térmico desenvolvido, destacando seu potencial como solução viável e sustentável. Além disso, enfatiza o papel ativo do consumidor final na transição energética,

demonstrando que, com tecnologias acessíveis e eficientes, é possível reduzir o impacto ambiental e atender às demandas energéticas futuras de maneira sustentável.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é investigar e propor uma solução acessível e sustentável para o aquecimento de água em residências, por meio de um sistema solar térmico de fabrico artesanal. O estudo visa reduzir o consumo de energia elétrica nas residências, especialmente no Brasil, onde o uso de chuveiros elétricos representa uma grande parcela do consumo de energia. Além disso, o trabalho busca avaliar o desempenho, a durabilidade e o custo-benefício desse sistema, utilizando uma análise integrada do ciclo de vida e das políticas de manutenção para melhorar o desempenho e reduzir os custos ao longo do tempo. O objetivo também é promover a autonomia energética e incentivar um modelo de consumo mais consciente e eficiente, contribuindo para a transição energética e o desenvolvimento sustentável, com foco na acessibilidade do projeto ao consumidor.

## **1.3 Estrutura**

Essa dissertação de mestrado foi estruturada em capítulos que, inicialmente, apresentam o enquadramento teórico, abordando o histórico da eletricidade, as fontes renováveis de energia, junto com as definições de ciclo de vida e políticas de manutenção aplicadas aos sistemas de energias renováveis. Uma análise detalhada é realizada sobre os sistemas de energia solar fotovoltaica e solar térmica, seguida por uma discussão sobre os métodos para obtenção de água quente sanitária em duas realidades distintas nos países: Portugal e Brasil. Um estudo de caso é realizado, aplicando os modelos e indicadores descritos para avaliar uma solução energética sustentável e de baixo custo. Por fim, no quinto capítulo é apresentado os resultados sobre o impacto da proposta e seu potencial para contribuir para a transição energética e o desenvolvimento sustentável.

## 2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Transformações Energéticas: Do Vapor à Eletricidade

Segundo o dicionário da língua portuguesa Priberam Informática (2024), a palavra “Energia” refere-se à capacidade que um corpo ou um sistema físico tem de produzir trabalho.

Podendo então a energia ser expressa de várias formas, por exemplo, através do movimento, luz, calor e som.

De acordo com Li *et al.* (2023) o progresso da humanidade é acompanhado pela substituição da energia ou pela melhoria dos modos de uso da energia.

No século XVIII, num contexto pré-revolução industrial, o crescimento e desenvolvimento económico estimulados pela industrialização exigia um novo tipo de energia superior à energia muscular (tração humana e animal) e as energias da natureza (hidráulica e eólica). Surgia então, a partir de conhecimentos empíricos de combustão e vaporização da água, uma energia artificial, através da conservação da pressão do vapor (Custódio, 2020).

A mecanização dos processos a partir da máquina a vapor foi possível graças às aplicações de transformações energéticas. A energia química presente no carvão mineral, através da sua queima, é convertida em energia térmica que, por sua vez é convertida em energia potencial graças à conservação de pressão da vaporização da água; essa pressão é então convertida em energia cinética com a movimentação de um êmbolo que realiza trabalho, Figura 1

Também durante o século XVIII o químico francês Antoine-Laurent de Lavoisier desenvolve o fundamento que “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”, o que se aplica à energia, que é convertida de um estado primário, para um fim específico.



Figura 1 - Fluxo de processos com as transições energéticas da máquina a vapor.

Para Ebrahimi (2023) durante a Revolução Industrial, quando o poder assumiu uma posição de impacto na produção, armazenamento, transmissão e na distribuição de produtos, foi determinado aos cientistas e artesãos que fizessem esforços para gerar energia mais eficiente de várias maneiras, usando diferentes fontes de energia. O que pouco tempo depois desencadeou uma nova revolução com a eletricidade e a eletrificação.

## 2.2 Eletrificação dos Setores

De acordo com Erenoglu *et al.* (2019) não é possível determinar quando e quem descobriu a eletricidade; entretanto os fenômenos elétricos vêm sendo observados desde 2750 anos a.C. quando os antigos egípcios evidenciavam descargas elétricas provenientes de peixes elétricos e, na Grécia antiga, 600 anos a.C. Tales de Mileto também observava os fenômenos elétricos nas suas experiências associadas à eletricidade estática. Ao longo dos anos vários cientistas conduziram experiências para controlar a eletricidade e encontrar formas utilizáveis deste fenômeno; no século XVII, o físico inglês William Gilbert, considerado o pioneiro e fundador do método experimental, pôs fim à era das ideias e sentimentos, e deu o início à era das experiências, teorias e invenções, fundamentais para o desenvolvimento da eletricidade. Entretanto foi somente no ano de 1882, com muitos fundamentos já difundidos, que a produção de energia para fins comerciais teve início, vindo como solução ao maior problema da época, a iluminação. Thomas Edison, conhecido também por inventar a lâmpada, foi o responsável por elaborar um gerador que forneceu 100 kW de potência, para iluminação de clientes na cidade de Nova York, Figura 2. Além da iluminação, a eletrificação foi impulsionada por setores, como as comunicações e as novas tecnologias que surgiam.

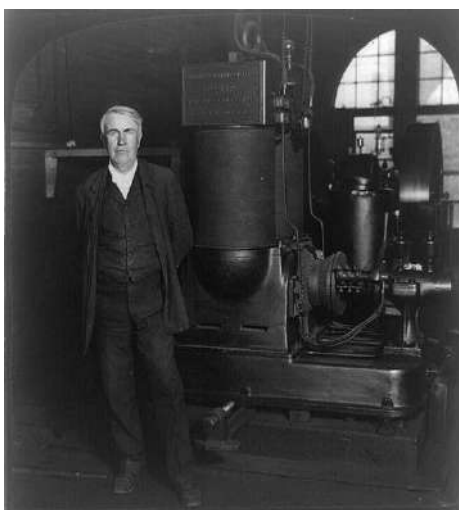


Figura 2 - Primeira usina de produção de energia elétrica.

Fonte: (H.C. White Co, ca.1906)

A aplicação das energias renováveis consiste em aproveitar fontes primárias de energia disponíveis na natureza, na forma cinética ou potencial, como a força dos

ventos, que já foi muito utilizada durante a era das grandes navegações para empurrar as velas, ou moer grãos em moinhos. Sendo essa força atualmente empregada para mover as hélices das várias centrais eólicas. Já a força das águas, de igual forma, teve grandes aplicações no passado; atualmente pode ser armazenada na forma de energia potencial gravitacional para ser convertida em energia cinética e posteriormente, em energia elétrica, Figura 3.

A energia solar é aproveitada de duas formas, diretamente em energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos, como também pode ser aproveitada para a produção de calor com os painéis solares térmicos.

Sendo a eletricidade a transformação energética final, antes é necessário a aplicação da energia cinética para movimentação da turbina numa central geradora de energia elétrica. Assim fez Thomas Edison na sua central, aproveitando a energia cinética da máquina a vapor já difundida na época (Lamarão, 2012).

A obtenção de eletricidade nos dias atuais é conseguida utilizando os mesmos fundamentos de transformações energéticas onde um estado primário de energia, (térmica, cinética, potencial gravitacional e irradiação solar) é convertido em energia elétrica.

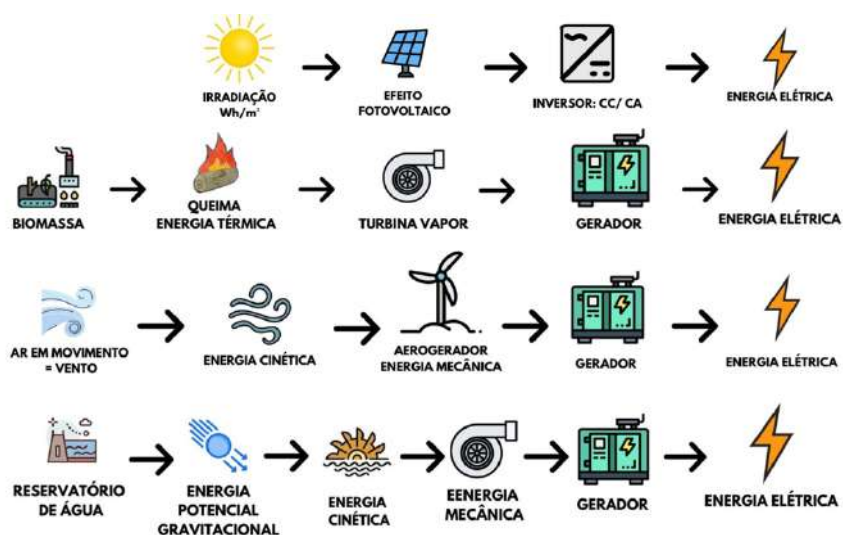


Figura 3 - Transformações energéticas para produção de eletricidade.

Fonte: (Adaptado de ENERGÊS, 2020)

Para Lamarão (2012) a eletricidade é dotada de duas características essenciais, a transmissibilidade, que permite à Energia Elétrica (E.E.) ser transportada através do espaço sem perdas consideráveis de energia, e a flexibilidade, que permite que a E.E. seja convertida em outras energias na forma de calor, luz e movimento.

Ebrahimi (2023a) considera que a eletricidade é a forma de energia mais útil e que possibilita o avanço da educação, saúde, alimentação, internet, entre outros bens, que permitiu uma melhor qualidade de vida. O que torna a eletrificação a primeira das 20 maiores conquistas da engenharia no século XX, identificadas pela Academia Nacional de Engenharia dos Estados Unidos e que, de acordo com a Tabela 1, a maior parte das outras realizações, dependem da E.E.

Tabela 1 - 20 maiores conquistas da engenharia no século XX.

1	Eletrificação	11	Autoestrada
2	Automóvel	12	Nave espacial
3	Avião	13	Internet
4	Abastecimento e distribuição de água	14	Imagem
5	Eletrônicos	15	Eletrrodomésticos
6	Rádio e TV	16	Tecnologias em saúde
7	Mecanização agrícola	17	Petróleo e tecnologias petroquímicas
8	Computadores	18	Laser e fibra ótica
9	Telefone	19	Tecnologias nucleares
10	Ar condicionado e refrigeração	20	Materiais de alto desempenho

Fonte: (Adaptado de Ebrahimi, 2023a)

O primeiro gerador para produção em larga escala de energia elétrica surgiu no ano de 1882, concebido por Thomas Edison; esse gerador produzia 100kW para o acendimento de lâmpadas na cidade de Nova York; desde então diversos tipos de geradores foram concebidos com as mais variadas formas de transformação energética para elétrica. Com os avanços da tecnologia, atualmente a usina com a maior capacidade de produção é capaz de fornecer 22 500 000 KW: trata-se da Central das Três Gargantas – China (Negri *et al.*, 2024).

A Tabela 2 considera os consumos médios dos eletrodomésticos mais comuns nas habitações, nos dias atuais. Para uma análise prática do avanço na produção elétrica, considerando o consumo mensal de uma habitação, enquanto que a primeira central construída conseguiria suprir a necessidade de, aproximadamente 10 casas, a central chinesa abastece, em simultâneo, 2.203.722 casas.

Tabela 2 - Consumo médio energético dos eletrodomésticos.

<b>Eletrodomésticos</b>	<b>Potência elétrica (kW)</b>	<b>Tempo de uso mensal</b>
Placa elétrica	1,35	30 horas/mês
Máquina de Café	1,2	15 horas/mês
Frigorífico	0,15	240 horas/mês
Máquina da louça	1,13	16 horas/mês
Aspirador	1,6	12 horas/mês
Televisão	0,12	120 horas/mês
Aparelhagem de som	0,06	60 horas/mês
Computador	0,3	90 horas/mês
Impressora a laser	0,8	10 horas/mês
Secador de cabelo	1,5	30 horas/mês
Radiador	2	60 horas/mês
Potência total	10,21	

Fonte: Adaptado de Goldenergy, 2021a)

Esse cálculo foi realizado dividindo a capacidade de fornecimento de cada central, com a potência total dos aparelhos. Esse crescimento exponencial foi realizado num

intervalo de 121 anos, considerando o surgimento da primeira central em 1882 até 2003, quando foi inaugurada a Central das Três Gargantas (Silvério, 2012).

Ao observar o Consumo de eletricidade em todo o mundo, entre os anos de 1990-2021, fornecido pela Agência Internacional de Energia, Figura 4, pode-se observar uma crescente procura no consumo de energia elétrica no cenário global, sendo registrado, no ano de 2021, o consumo de elétrico mundial de 26.467, 2 TWh.

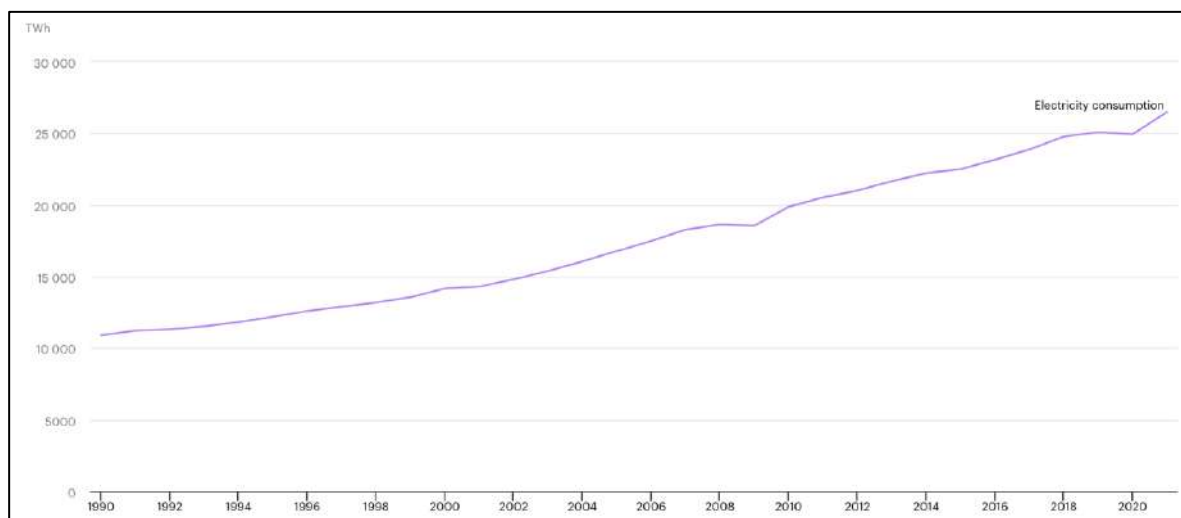


Figura 4 - Consumo de eletricidade, mundo, 1990-2021.

Fonte: (IEA, 2023a)

Para Nan *et al.* (2022) a necessidade de produzir cada vez mais energia é justificado com o aumento da população e das atividades económicas, sendo esperado que, até 2050, o consumo energético pelo menos duplique.

Através da queima dos combustíveis fósseis (Carvão, Gás Natural e Petróleo), a energia pode ser aplicada em processos térmicos, como, por exemplo, o fabrico de aço nas siderurgias. Outro processo onde pode ser aplicada a energia térmica é na produção de movimento (energia cinética), pelos motores a combustão, onde também podem ser utilizados os biocombustíveis, como o etanol. Outro exemplo de aplicação da energia térmica são as centrais termoelétricas que utilizam o vapor sobreaquecido para movimentar uma turbina e obter eletricidade.

A utilização de calor para a produção de eletricidade também é visto nas usinas nucleares que possuem um processo similar ao de uma termoelétrica, entretanto, são as reações nucleares que produzem o calor necessário para geração do vapor que movimenta o gerador.

No contexto geral da utilização de energia, com base no gráfico da *International Energy Agency* (IEA) representado na Figura 5, as fontes predominantes na matriz energética global são as energias térmica e cinética, aplicadas, seja para aquecimento ou movimentação de geradores.

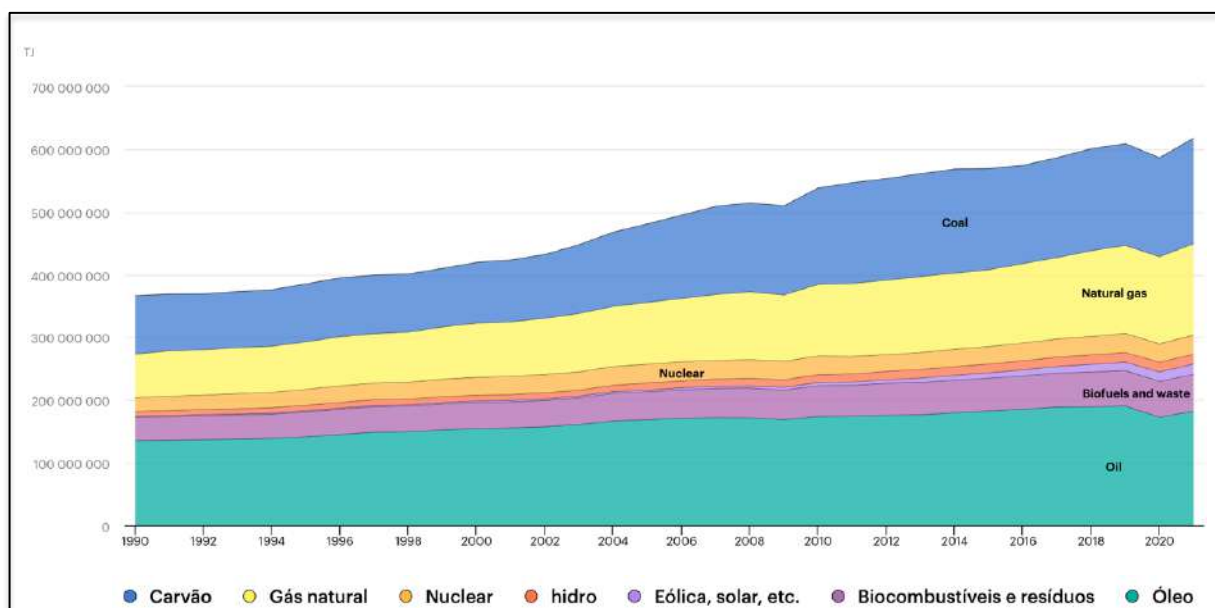


Figura 5 - Fornecimento total de energia por fonte, 1990-2021.

Fonte: (IEA, 2023b)

Analisando apenas a percentagem de cada fonte, Figura 6, nota-se uma redução na utilização do petróleo, que é aplicado principalmente para produção de combustíveis que alimentam os motores dos veículos de transporte, embora também possam ser aplicados em geradores a combustão.

A eletricidade, por não ser uma forma de energia primária, para obtê-la é necessário recorrer às transformações energéticas. Ao analisar a produção de eletricidade por fonte no mundo, entre os anos 1990-2021, Figura 6, a queima de carvão e gás natural formam a maior parte das fontes geradoras de energia elétrica e, com o aumento da procura energética, aumentaram a queima dos combustíveis fósseis.

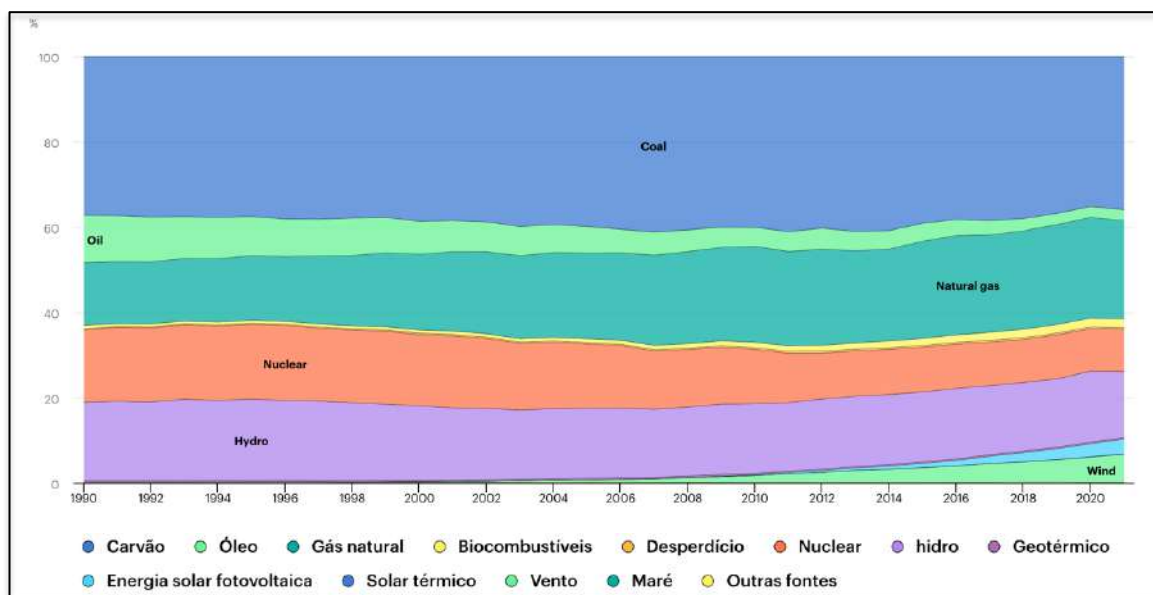


Figura 6 - Percentagem da produção de eletricidade por fonte, 1990-2021.

Fonte: (IEA, 2023b)

Ebrahimi (2023a), escreve em seu livro *Power Generation Technologies*, que no ano de 2020, os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), nucleares e renováveis, produziram 60,92%; 10,12% e 28,97% da eletricidade total, enquanto há 10 anos, em 2010, produziam 67,04%; 12,9% e 20,06% da eletricidade total, o que mostra uma redução na utilização de combustíveis fósseis e considerável aumento nas energias renováveis, o que pode ser verificado no gráfico da Figura 6. Apesar da redução no consumo dos combustíveis fósseis, estes recursos são limitados e são utilizados de forma mais rápida do que a natureza consegue formar novas reservas, o que os tornam elementos limitados e já com previsão de esgotar, sendo previsto que essas reservas de carvão, petróleo e gás, a partir de 2017, estarão esgotadas em 133, 47 e 52 anos, respectivamente, Figura 7. E mesmo que esse período se estenda, não se compara com o tempo da vida humana anterior na terra, o que conduz a uma mudança nos métodos de obtenção de energia.

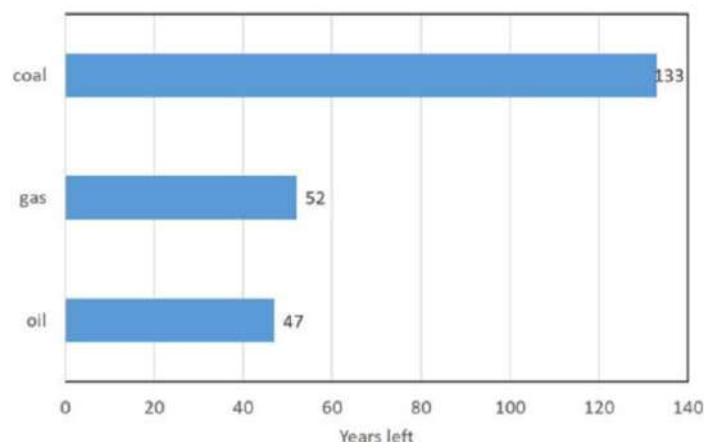


Figura 7 - Previsão de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis.

Fonte: (Ebrahimi, 2023a)

Uma transição energética está em andamento para além de uma preocupação global com o esgotamento dos combustíveis fósseis, de onde provém a maior parte dos recursos energéticos. Também existe um novo fator que surgiu com o aumento da produção de energia térmica graças à queima de combustíveis fósseis, o aquecimento global que para Ebrahimi (2023a) é uma grande ameaça à raça humana.

### **2.3 Aquecimento Global e a Urgência da Descarbonização**

A partir da revolução industrial no século XVIII, por volta do ano 1905 até 1909, as temperaturas globais começaram a subir, e foi o suficiente para intensificar a evaporação das águas superficiais e iniciar o derretimento das geleiras. As consequências disso são o aumento do nível do mar e padrões de precipitação mais frequentes, o que leva a inundações e secas (Ameur *et al.*, 2022).

De acordo com Letcher (2019) antes da revolução industrial a concentração de CO<sup>2</sup> na atmosfera foi medida no Observatório Mauna Loa, apresentando 280 moléculas para cada 1 milhão, no ano de 2017, tendo o teor de dióxido de carbono crescido

para 413 PPM – Partes Por Milhão, Figura 8. Esse aumento de quase 50% alterou o ciclo carbônico e provocou um aumento da temperatura global, verificado através do índice de variação de temperatura, produzidos pelo Instituto Goddard de Estudos Espaciais da NASA, Figura 9.

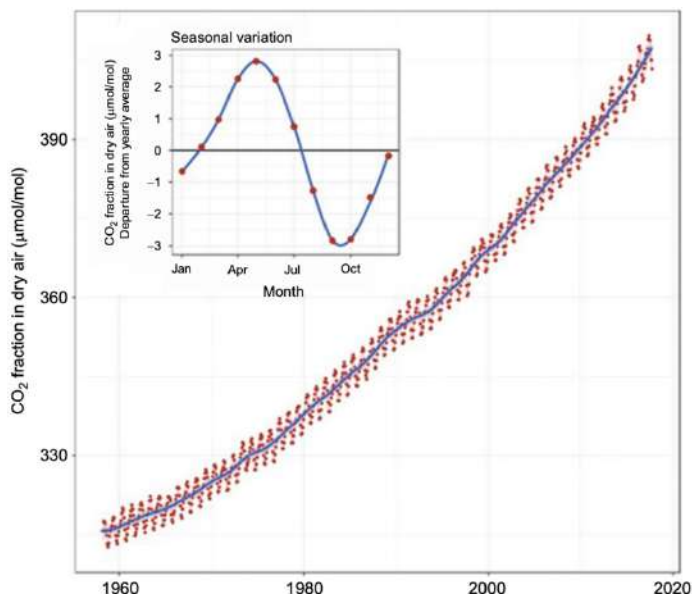


Figura 8 - Aumento da concentração de CO<sub>2</sub> de 1958 – 2017.

Fonte: (Letcher, 2019)

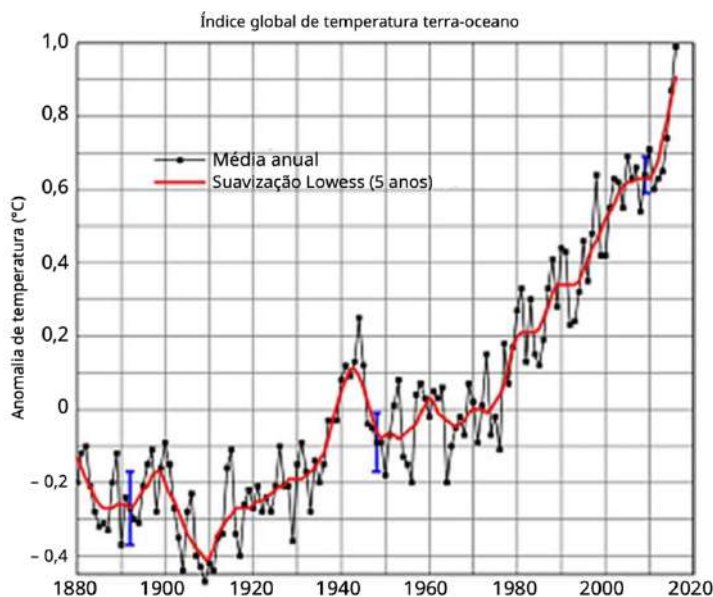


Figura 9 - Aumento na temperatura média do ar na superfície terrestre de 1880-2009.

Fonte: (Letcher, 2019)

Através das propriedades dos gases, como o comprimento de onda, cientistas puderam analisar os causadores do efeito de estufa e verificaram que o CO<sup>2</sup> é responsável por 20%, enquanto o vapor de água é responsável por 60%; entretanto, a evaporação das águas oceânicas está diretamente ligada ao aquecimento global,

sendo o dióxido de carbono o principal fator responsável por esse fenômeno (Letcher, 2019).

Tendo em conta a natureza transfronteiriça da poluição atmosférica, foi necessária uma ação coletiva global para impedir o avanço do aquecimento do planeta; assim, durante a Terceira Conferência das Partes sobre a Convenção do Clima (COP -3), foi assinado, em Quioto no Japão, um protocolo com o objetivo de limitar aos países desenvolvidos a emissão de gases com efeito de estufa (Maamoun, 2019).

Entrando em vigor apenas em fevereiro de 2005, de acordo com Goldenergy (2024a) o Protocolo de Quioto não foi suficiente para conter o agravamento, por não abranger todos os países e o abandono do acordo, por parte de algumas nações altamente poluidoras, como fizeram os Estados Unidos em 2011. Em 2020 esse acordo foi substituído pelo Acordo de Paris.

A Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC) foi uma conferência das Nações Unidas realizada em Paris no ano de 2015, onde os líderes mundiais entraram em consenso sobre impedir o avanço da temperatura global, estipulando uma meta que, até ao ano de 2100, a temperatura da terra não subiria mais que 2°. Para tal, medidas complementares foram tomadas, como a neutralidade carbónica até 2050 (Obiora *et al.*, 2024).

De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente, o novo acordo renova a esperança no multilateralismo e aponta para a necessidade de uma descarbonização profunda da economia mundial. Representando uma mudança de paradigma com o reconhecimento explícito de que apenas com a contribuição de todos é possível vencer o desafio das alterações climáticas.

Cada um dos países que assinou o Acordo de Paris teve de criar e apresentar um documento com as suas próprias metas, esse documento tem por nome *Nationally Determined Contributions* (NDC), que significa Contribuição Nacionalmente Determinada, e cada nação teve cinco anos para apresentá-lo, entre 2015 e 2020, tendo Portugal apresentado o seu roteiro para a neutralidade carbónica em 2019 (República Portuguesa, 2019).

Segundo o Jornal Público (2022), com a entrega do Roteiro para a Neutralidade Carbónica, o país comprometeu-se a alcançar os objetivos antes do prazo, em 2045, através do encerramento das centrais a carvão e investindo na transição energética dos transportes públicos e ferroviários, bem como na utilização de hidrogénio no lugar do gás natural.

Cerca de dois terços das emissões de gases de efeito de estufa provêm da produção e uso de energia, por isso é importante enfatizar a transição dos combustíveis fósseis na produção de energia, bem como na cadeia de abastecimento de energia (Obiora *et al.*, 2024).

Segundo Mirza *et al.* (2024) uma transição para energia 100% renovável é um discurso polarizado devido à natureza transitória das fontes renováveis, como, por

exemplo, a intensidade do vento, a radiação solar e os períodos de seca. Entretanto existe a possibilidade de iniciar essa transição por meio da eletrificação de todos os setores, como os transportes e o aquecimento que, já nos dias atuais é possível observar nos carros elétricos e nas tecnologias para climatização, como a bomba de calor.

Para obtenção de luz à noite, já não é necessária uma tocha; a eletricidade acende uma lâmpada ao carregar um botão; da mesma forma, já existem fogões a indução elétrica que descartam a utilização direta do fogo.

De acordo com Letcher (2019) a energia proveniente dos combustíveis fósseis pode ser substituída pelas fontes renováveis e nuclear; entretanto será um problema no setor dos transportes aéreos e marítimos. Mesmo com a utilização de biocombustíveis, essa é uma parcela que representa apenas 4% dos combustíveis de transporte, num cenário mundial.

Uma vez que o setor de energia constitui uma parcela significativa das emissões globais, é importante concentrar-se na redução das emissões na produção desta. (Obiora *et al.*, 2024). Também, de acordo com Chris, (2019) todos os cenários que cumprem a meta do Acordo de Paris até 2100 exigem que o consumo anual de energia com emissões zero aumente, pelo menos, 20 vezes em relação à sua base de 2014.

Uma investigação do jornal *The Guardian* concluiu que a maioria dos principais cientistas climáticos, preveem que o acordo de Paris não será cumprido e, até o fim do século, o planeta aqueça, pelo menos, 2,5°C. Sendo a falta de vontade política e os interesses empresariais os principais motivos pelos quais não é possível atingir a meta climática. De acordo com M. Soares (2024), atualmente, a temperatura média de 1,61°C a mais que no período pré-industrial, sendo abril de 2024 o mês mais quente desde que se tem registro, Figura 10.

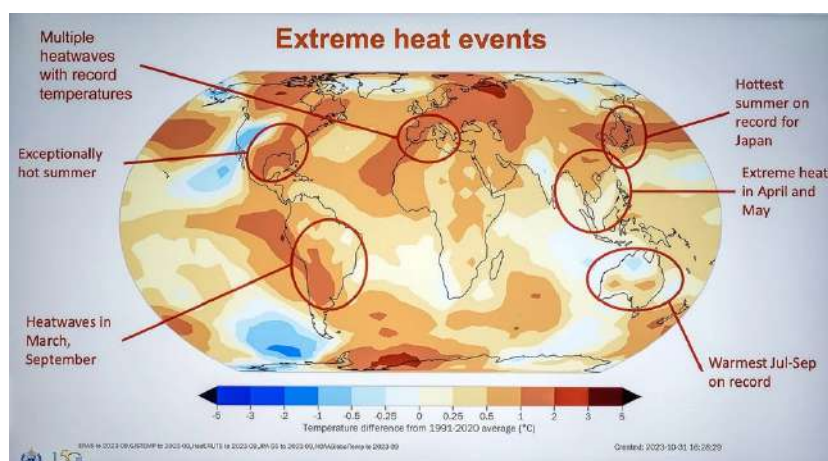


Figura 10 - Apresentação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) sobre acontecimentos de calor extremo em 2023.

Fonte: (M. Soares, 2024)

Uma diferença de 2°C na temperatura não provoca nas pessoas um sentimento de catástrofe; entretanto, o que muitos não sabem, é que a crise do aquecimento global levará a outras crises sobre a água potável e terras, que serão razões suficientes para conflitos internacionais e até guerras mundiais (Ebrahimi, 2023b).

## **2.4 Desenvolvimento Sustentável: Objetivos Globais e Compromissos com o Futuro**

Com o objetivo de conciliar o desenvolvimento económico com a conservação ambiental, o termo desenvolvimento sustentável surgiu numa comissão da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre meio ambiente e desenvolvimento. O desenvolvimento sustentável vem do entendimento que não há progresso sem que haja condições naturais para a vida humana; assim, em 2015, os 193 países membros da ONU comprometeram-se a adotar a Agenda Pós-2015, que diz que as nações devem trabalhar para cumprir os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Goldenergy, 2024b).

A agenda pós 2015 foi um processo da ONU para formular os novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em substituição das propostas pautadas pelos Objetivos de Desenvolvimento do Milénio (ODM), criado entre 1990-2000. Então foi criado um plano de ação com 17 objetivos e 169 metas, com validade até o ano de 2030, formando a Agenda 2030 (GT Agenda 2030, n.d.)

De acordo com o Ministério das Relações Exteriores do Brasil (2016), os objetivos apresentados na Figura 11, são divididos em quatro grupos, social, ambiental, económico e Institucional, listados a seguir:

1. Erradicação da pobreza: acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares.
2. Fome zero e agricultura sustentável: acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.
3. Saúde e bem-estar: assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades.
4. Educação de qualidade: assegurar a educação inclusiva, equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos.
5. Igualdade de género: alcançar a igualdade de género e empoderar todas as mulheres e meninas.
6. Água limpa e saneamento: garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos.
7. Energia limpa e acessível: garantir acesso à energia barata, fiável, sustentável e renovável para todos.

8. Trabalho decente e crescimento económico: promover o crescimento económico inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos.
9. Inovação das infraestruturas: construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação.
10. Redução das desigualdades: reduzir as desigualdades dentro dos países e entre eles.
11. Cidades e comunidades sustentáveis: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.
12. Consumo e produção responsáveis: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.
13. Ação contra a mudança global do clima: tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e os seus impactos.
14. Vida na água: conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.
15. Vida terrestre: proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da Terra e deter a perda da biodiversidade.
16. Paz, justiça e instituições eficazes: promover sociedades pacíficas e inclusivas para, com o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis.
17. Parcerias e meios de implementação: fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.



Figura 11 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Fonte: (Ministério das Relações Exteriores do Brasil, 2016)

Focando-se na ODS 7 (Energia limpa e acessível) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e, de acordo com o BCSO Portugal (2022), garantir energia renovável e acessível para todos, aumentando a participação das energias renováveis no mix global de energia, além de reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso à pesquisa e tecnologia de energia limpa e quando se atualiza a tecnologia para fornecer serviços de energia modernos e sustentáveis, isso contribui diretamente para a redução das mudanças climáticas. Assim, as energias renováveis são o caminho para o desenvolvimento sustentável.

## 2.5 Energias Renováveis: Tecnologias e Potencial

Em alternativa aos combustíveis fósseis, na natureza existem outras fontes de energia que, além de naturais, são inesgotáveis e não provocam resíduos. A radiação solar, a força dos ventos, o fluxo das águas, o calor do interior do planeta, e força das correntes oceânicas podem ser utilizados em processos de transformação energética para obtenção de calor e eletricidade. Os avanços tecnológicos permitem que as energias renováveis se tornem mais competitivas, reduzindo o custo de produção e manutenção (Velásquez & Zloccowick, 2018).

Na Figura 12, são apresentadas as principais fontes de energia renováveis e as suas capacidades de produção de eletricidade, do ano 1990 até 2021.

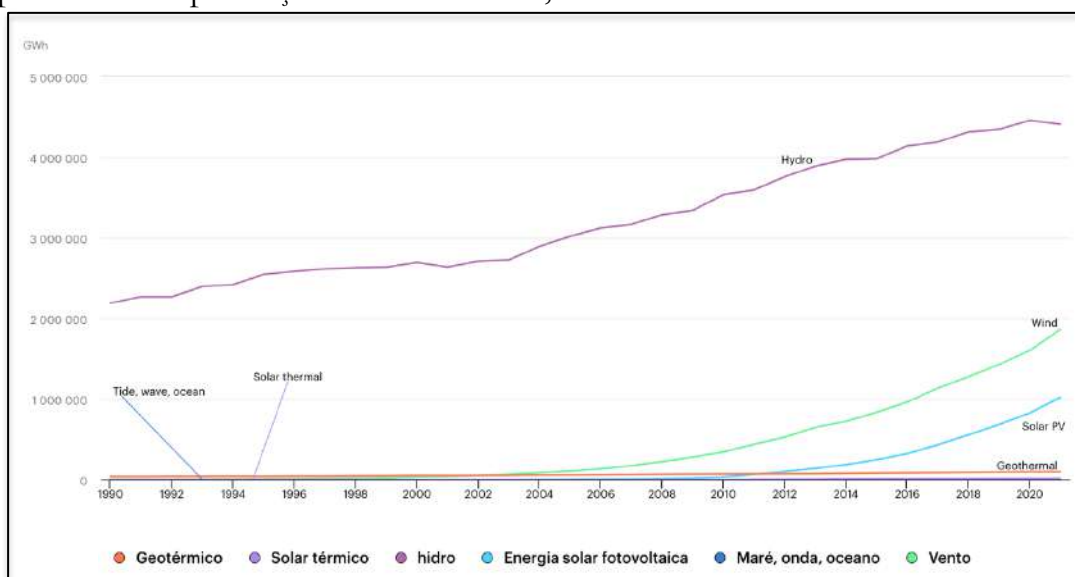


Figura 12 - Produção de eletricidade renovável por fonte (não combustível) 1990-2021.

Fonte: (IEA, 2023c)

Quantificando a matriz energética renovável, é apresentado na Tabela 3 os resultados de 2021 referentes à produção de eletricidade. Ao ser comparado com o consumo total de eletricidade no mesmo ano (Figura 4), a matriz renovável representa uma pequena fração da quantidade total de energia elétrica consumida, 26.467, 2 TWh, em comparação com os 7.406,61 TWh produzidos por fontes renováveis, compondo 27,98% da produção de energia elétrica consumida em 2021. Isso

evidencia a necessidade urgente de uma expansão significativa na capacidade de produção de energia renovável para atender à crescente demanda global.

Tabela 3 - Produção de eletricidade renovável por fonte (não combustível), 2021.

<b>Fonte</b>	<b>Produção Anual (TWh)</b>	<b>Proporção (%)</b>
Hidrelétrica	4 410,98	59,55
Eólica	1 864,07	25,17
Solar Fotovoltaica	1 020,44	13,78
Geotérmica	95,52	1,29
Solar Térmico	14,63	0,20
Maré, Onda, Oceano	0,98	0,01
<b>Total</b>	<b>7 406,61</b>	<b>100,00</b>

Fonte: (Adaptado de IEA, 2023c)

## 2.5.1 Energia Solar

A energia solar pode ser aproveitada de duas maneiras, para produção de eletricidade, através do efeito fotoelétrico com a captação da radiação solar em forma de luz em painéis fotovoltaicos, Figura 13, e também para obtenção de calor, por meio da radiação solar infravermelha, onde coletores absorvem e concentram o calor, Figura 14.



Figura 13 - Painéis Solares Fotovoltaicos para produção de energia elétrica.

Fonte: (Sousa & Franco, 2018)



Figura 14 - Painéis solares térmicos para produção de água quente.

Fonte: (Proteu, 2023)

De acordo com Ebrahimi (2023b), a Terra recebe continuamente 172 TW de energia solar, o que representa mais de 10.000 vezes a procura energética global; entretanto essa radiação é afetada pela cobertura de nuvens, névoa, poluição do ar, latitude do local e época do ano, Figura 15.

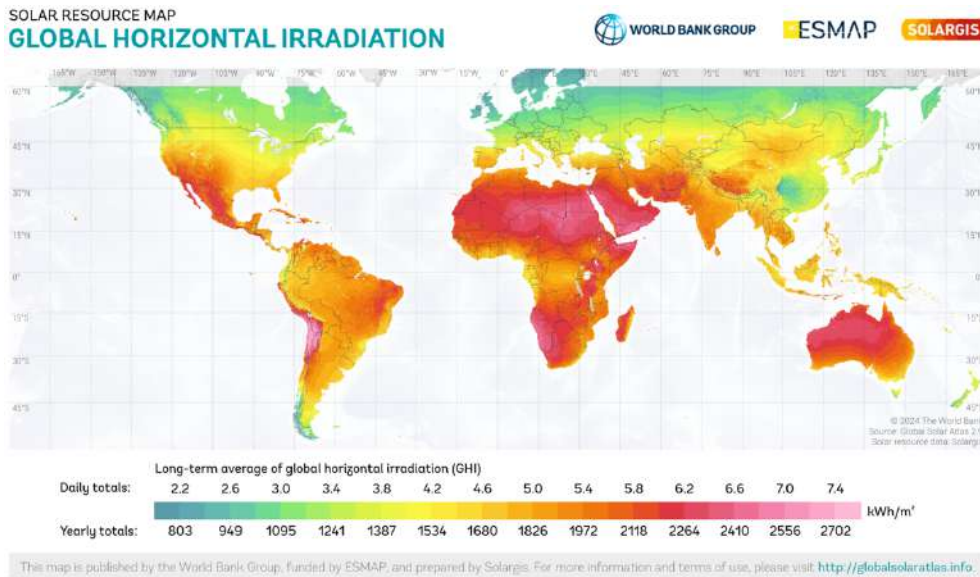


Figura 15 - Irradiação solar horizontal global na Terra.

Fonte: (Global Solar Atlas, 2024)

Este mapa mostra a radiação solar difusa, que é dispersa na atmosfera e chega à superfície terrestre após ser espalhada pelas nuvens, poeira, vapor d'água e outras partículas atmosféricas.

Segundo Voiland (2022), 2.245 MW é a capacidade total de um dos maiores parques para produção fotovoltaica, o parque solar Bhadla em Rajasthan, Índia, que cobre uma área de 57 quilômetros quadrados, Figura 16.



Figura 16 - Parque solar Bhadla em Rajasthan, Índia.

Fonte: (Voiland, 2022)

## 2.5.2 Energia Eólica

A energia eólica é obtida a partir da força das correntes de ar, que movimentam um aerogerador, instalado em terra (*onshore*), Figura 17, ou no mar (*offshore*). A instalação dessas torres eólicas está sujeita a locais onde a velocidade anual média do vento seja superior aos seis metros por segundo. Atualmente  $\frac{1}{4}$  da eletricidade consumida em Portugal é proveniente de parques eólicos. (EDP Comercial, 2023)



Figura 17 - Aerogeneradores (*on-shore*).

Fonte: (Iberdrola, 2023)

Segundo (Ebrahimi, 2023a) a Agência Internacional de Energia avaliou em 2019 o potencial técnico de energia eólica *offshore* através de análise geoespacial, e os resultados mostraram que, nos melhores locais perto da costa, poderiam gerar cerca de 36.000 TWh/ano, mais do que a procura global de eletricidade em 2019. Na Figura 18, é indicado por tons vermelhos os locais com a maior densidade de vento.

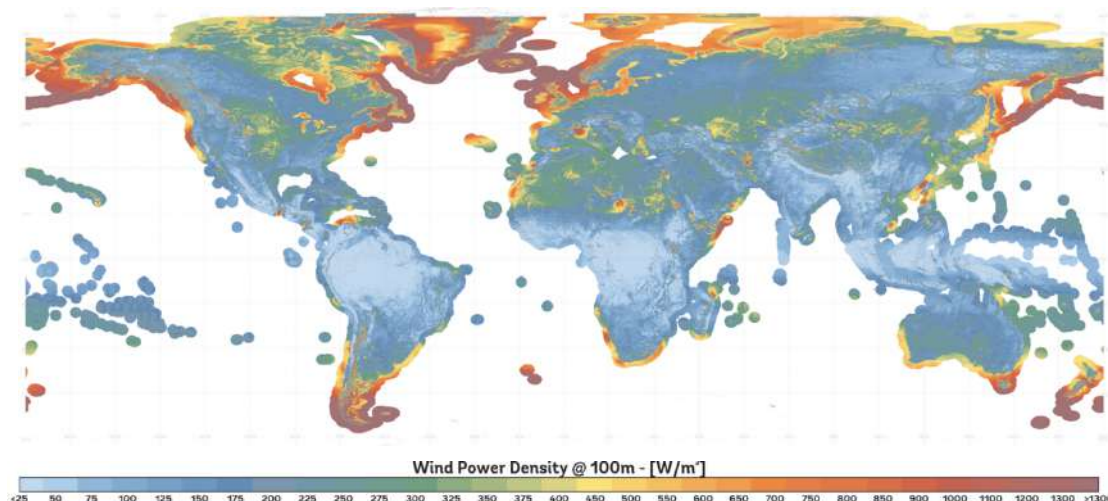


Figura 18 - Potencial de densidade de energia eólica em 2019.

Fonte: (Adaptado de World Bank Group, 2019)

Nos dias atuais, o maior parque eólico do mundo fica na China; trata-se do Parque Eólico de Gansu, Figura 19, que conta com uma capacidade de produção de 20.000 MW. (Chicon, 2023)



Figura 19 - Parque Eólico de Gansu, China.

Fonte: (Chicon, 2023)

A Associação de Energias Renováveis (APREN) considera que, em 2019, as energias renováveis representaram 55,2% de toda a eletricidade consumida em Portugal, sendo que a energia eólica foi a grande protagonista das renováveis, totalizando 27% de toda a energia produzida no país (Goldenergy, 2021b).

Se os aumentos lineares na produção de 2008 a 2015 continuarem nas próximas décadas, a energia eólica deverá fornecer 3.985 TWh globalmente em 2050, em comparação com a produção de 2015 de 841 TWh (Moriarty & Honnery, 2019).

### **2.5.3 Energia Hídrica**

De acordo com Thompson (2024), a energia hidráulica, também chamada energia hidroelétrica, é a energia que aproveita a energia mecânica da água em movimento e a transforma em energia elétrica através de centrais hidroelétricas, classificadas em vários tipos:

Centrais hidroelétricas de reservatórios, conhecidas também como centrais de acumulação; essas centrais armazenam água em reservatórios criados por barragens. Quando há procura por eletricidade, a água é libertada das represas, passando por turbinas hidráulicas para gerar energia elétrica.

Centrais hidroelétricas de água corrente - estas centrais aproveitam o fluxo natural de rios ou correntes para gerar eletricidade. Geralmente não envolvem a criação de grandes reservatórios, e a água é capturada e encaminhada para as turbinas diretamente do curso do rio.

Centrais hidroelétricas de armazenamento reversível ou por bombagem são instalações com dois reservatórios, um superior e outro inferior - neste tipo de hidroelétrica a eletricidade produzida em excesso alimenta bombas hidráulicas que, por sua vez, deslocam a água do reservatório inferior para o superior. Quando a procura de E.E. volta a crescer, a água do reservatório elevado faz a movimentação dos geradores. Este sistema é eficiente para equilibrar a oferta e demanda de energia, especialmente com fontes intermitentes, como a solar e a eólica.

Segundo a IEA (2021), a energia hidroelétrica é a espinha dorsal da produção de eletricidade com baixo teor de carbono, fornecendo quase metade da produção atual de eletricidade renovável, chegando a ser 55% superior à produção de energia nuclear e superior a todas as outras energias renováveis, incluindo eólica, solar, bioenergia e geotérmica (Tabela 3). Em 2020 a energia hidroelétrica correspondeu a 17% de toda a produção global de eletricidade, tornando-se a terceira maior fonte depois do carvão e do gás natural. Entretanto, apesar dos aspectos positivos, várias barreiras impedem uma implantação mais rápida desse tipo de centrais; entre os anos 2000-2020 o setor público possuía e operava 70% de toda a capacidade hidroelétrica instalada a nível mundial; associado a isso vêm longos processos de licenciamento, custos e riscos elevados devido à avaliação ambiental e oposição das comunidades locais.

Para Ebrahimi (2023b), o principal desafio para as centrais hidroelétricas é a sua dependência do clima, das condições hídricas, dos padrões de escoamento da água e dos volumes dos reservatórios de água. Esses parâmetros podem ser fortemente afetados pelas chuvas, acumulação de neve e derretimento.

Segundo a IEA (2021), alcançar zero emissões globais líquidas até 2050 exigirá um aumento significativo nas ambições hidroelétricas, sendo previsto um aumento de 40% na capacidade hidroelétrica global, atualmente liderada pela China que representa 40% da produção hidroelétrica mundial, Figura 20.

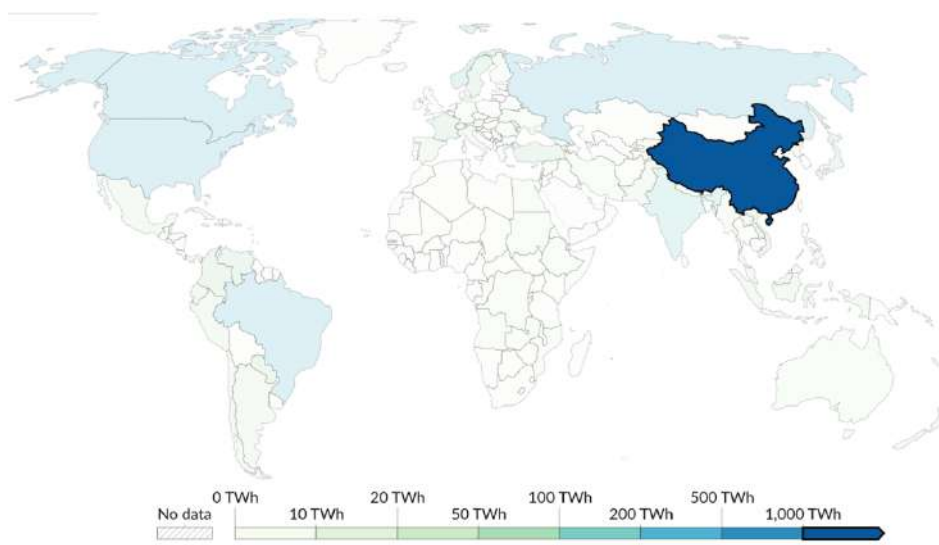


Figura 20 - Produção hidroelétrica mundial, 2023.

Fonte: (Ember and Energy Institute, 2024)

Nos dias atuais, a maior central hidroelétrica já construída fica na China, com o nome de Central das Três Gargantas, Figura 21, tendo a capacidade de gerar 22.500 MW de energia elétrica (Negri *et al.*, 2024).

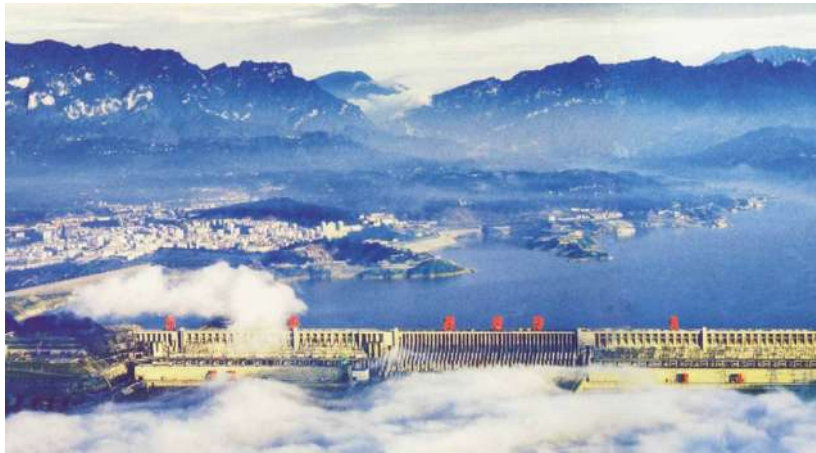


Figura 21 - Usina das Três Gargantas, China.

Fonte: (Silvério, 2012)

#### **2.5.4 Energia Geotérmica**

A energia geotérmica permite a utilização do calor do interior da terra para obtenção de água a altas temperaturas. Nas centrais geotérmicas, o vapor produzido é direcionado para o acionamento de turbinas geradoras de eletricidade, podendo ser também usado para aquecimento (D. Silva, 2022).

De acordo com o trabalho de Leitão (2014), este recurso energético está presente diversos países, Figura 22, e é aproveitado com base na temperatura do fluido geotérmico, podendo esse, ser de alta entalpia onde a temperatura é superior aos 150°C, baixa entalpia, com abaixo de 150°C e muito baixa entalpia onde a temperatura é inferior aos 30 graus.

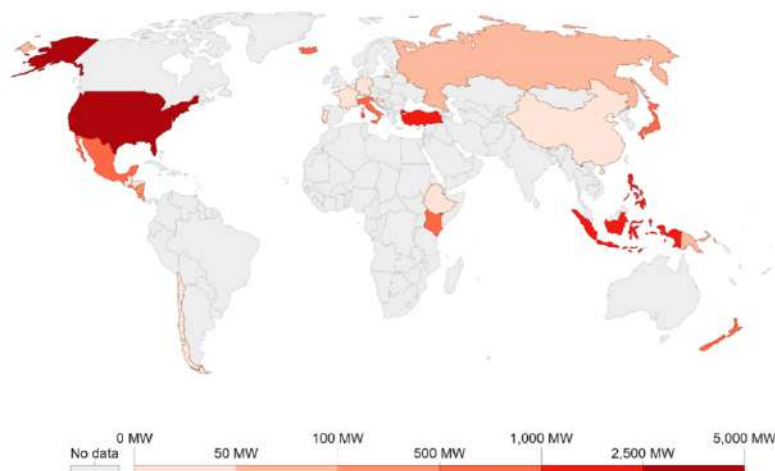


Figura 22 - Atividade geotérmica no mundo

Fonte: (D. Silva, 2022)

Nos locais mais favoráveis, a energia geotérmica manifesta-se naturalmente sob a forma de fontes termais, geiseres ou vulcões. Segundo Pimenta (2024), a energia geotérmica não é mais bem aproveitada no mundo devido à sua viabilidade restrita aos locais com atividade geotérmica significativa. A necessidade de investimentos em perfuração e infraestrutura faz com que os custos iniciais de instalação sejam elevados, restringindo a difusão da energia geotérmica. Outro fator negativo é a possibilidade de impactos ambientais, como a liberação de gases nocivos e sismicidade induzida. Por outro lado, um fator positivo pode ser encontrado na Islândia, onde os recursos geotérmicos são abundantes: cerca de 90% das casas são aquecidas com água quente geotérmica, e uma parcela significativa da eletricidade do país é gerada a partir de centrais geotérmicas.

Em Portugal, apenas na ilha de São Miguel nos Açores há produção de eletricidade de forma significativa através de energia geotérmica. Nesta ilha encontram-se em funcionamento duas centrais geotérmicas, a Central da Ribeira Grande e a Central do Pico Vermelho, Figura 23, as quais são responsáveis por uma produção de cerca 42% da energia elétrica consumida naquela ilha e 22% do Arquipélago dos Açores (Leitão, 2014).



Figura 23 - Central Geotérmica do Pico Vermelho.

Fonte: (Rio, 2011)

Segundo Ebrahimi (2023b), 94 TWh de energia foram gerados pela energia geotérmica em 2020, que deve atingir mais de 330 TWh em 2030 para atender à meta de zero emissões de carbono até 2050. Isso significa que, anualmente, 3,6 GW de capacidade devem ser aumentados para atingir a meta.

### **2.5.5 Energia dos Oceanos**

A energia marinha, também chamada de energia oceânica ou maremotriz, pode ser captada através de vários métodos, patenteados por diversos países; desse modo os métodos de captação não convergem, como, por exemplo, a captação de energia eólica (Malar, 2021).

Garcia (2019) diz em seu trabalho que apesar da variedade de métodos para captação de energia, os principais são através da subida e descida das marés e movimento das ondas, onde são encontradas as energias cinética e potencial, Figura 24.

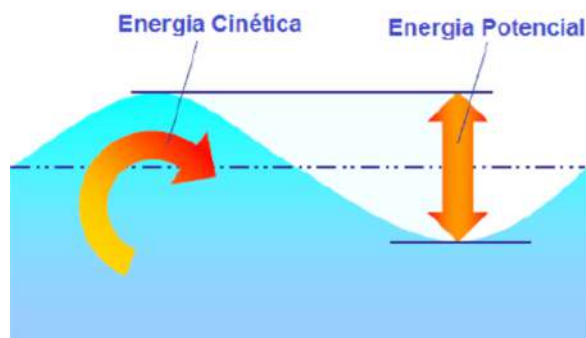


Figura 24 - Energia cinética e potencial por meio do movimento marítimo.

Fonte: (Garcia, 2019)

O movimento das marés gera energia cinética que, por sua vez, põe uma turbina a funcionar, produzindo eletricidade, enquanto a oscilação das ondas desloca um êmbolo, que se move para cima e para baixo dentro de um cilindro, o que faz trabalhar um gerador (EDP Comercial, 2023).

O mais comum é represar a maré alta e depois deixar fluir na maré baixa, passando por uma turbina e gerando eletricidade. Isso é uma central maremotriz que, atualmente em comparação com o método das ondas é mais aplicado em países como França, Canadá e Coreia do Sul (Malar, 2021).

A Central de La Rance é a maior do género maremotriz, e fica na França, na região de Bretanha; está em operação desde 1967 com uma potência de 240 MW. Contudo, no litoral da Escócia está em desenvolvimento a central de MeyGen, Figura 25, com capacidade de 400 MW. Em Portugal, o parque de ondas da Aguçadoura, localizado na Póvoa de Varzim, utiliza três estruturas cilíndricas articuladas semi-submersas, com uma potência de 750 kW (Bermann, 2022).

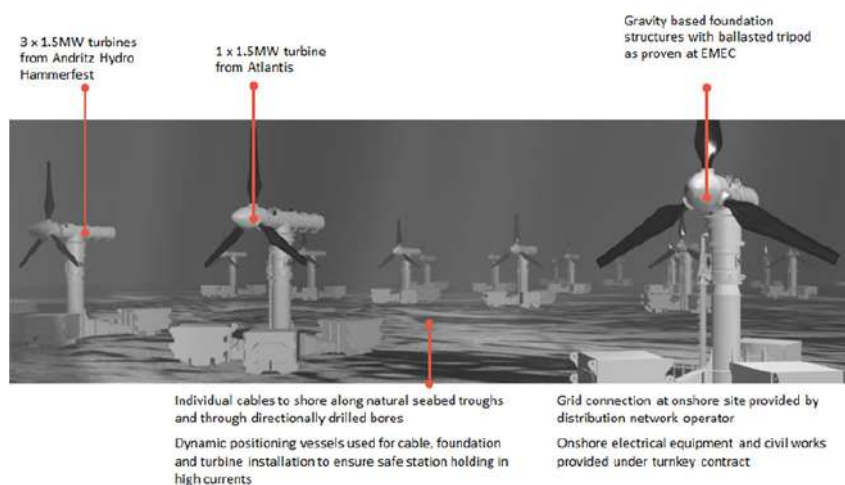


Figura 25 - Usina de MeyGen

Fonte: (Ramos, 2024)

No Brasil, a central do Porto de Pecém, Fortaleza, Ceará, desenvolvida pela COPPE/UFRJ, Figura 26, utiliza a energia das ondas de uma forma diferente. Através do movimento de dois braços mecânicos com 22 metros de comprimento e duas boias com 10 metros de diâmetro, a subida e descida dos braços acionam uma bomba para pressurizar a água de um circuito fechado e armazená-la num acumulador ligado a uma câmara hiperbárica.



Figura 26 - Usina de ondas do Porto do Pecém.

Fonte: (Bermann, 2022).

A água altamente pressurizada forma um jato responsável pela movimentação da turbina, que, por sua vez, aciona o gerador de energia elétrica. Essa central tem capacidade para produzir 50 kW de eletricidade (Bermann, 2022).

As pesquisas e o desenvolvimento de equipamentos para essas energias, em especial a das ondas, começaram há pouco tempo, o que torna os custos altos e dificultam a eficiência na produção que justifique o investimento; a redução de custos e a alta eficiência da energia de ondas devem ocorrer entre os próximos cinco a dez anos.

Segundo Bermann (2022), o aproveitamento da energia dos mares para a produção de eletricidade alcançou, em 2019, apenas 1,2 TWh (1,2 bilhões de kWh), o que equivale a menos de 0,1% do total de energia elétrica produzida no mundo.

Ainda com base no trabalho de Bermann (2022), estima-se que a energia dos mares cresça 33% ao ano no período 2020-2030, para que sua participação no cenário das emissões dos Gases do Efeito Estufa até 2050 seja mais significativa, alcançando 4 TWh em 2025 e 15 TWh em 2030. Para tal são necessárias políticas públicas que promovam ciência, tecnologia e inovação para que sejam alcançadas maiores reduções de custos visando o aproveitamento em maior escala.

## **2.6 Ciclo de Vida: Conceitos, Modelos e Aplicações**

Compreender as fontes de energia renováveis e seus impactos na matriz energética global exige mais que uma análise de sua capacidade técnica ou econômica. É fundamental avaliar como esses sistemas se comportam ao longo de sua vida útil, desde a concepção até o descarte. Esta abordagem, conhecida como análise do ciclo

de vida, permite mensurar não apenas o desempenho energético, mas também os custos, os impactos ambientais e as previsões de manutenção dos sistemas ao longo do tempo. Para garantir que essas avaliações sejam feitas de forma consistente e confiável, normas e diretrizes internacionais foram elaboradas, fornecendo uma base metodológica sólida para estudos e práticas aplicadas.

A palavra ISO, ouvida muitas vezes no mundo da engenharia tem como significado, *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização), trata-se de uma organização fundada em 1946 com sede em Genebra, na Suíça, formada inicialmente por representantes de 25 países e com o principal objetivo de promover o desenvolvimento de normas, impulsionando o comércio de bens e serviços no mercado nacional e internacional (ISO, 2024).

Como exemplo, tem-se a amplamente conhecida norma ISO 9001 – Sistema de Gestão da Qualidade.

Existem diversas normas ISO para os mais variados temas, entretanto, para esse estudo serão analisadas a família de normas ISO 55000, que englobam a gestão de ativos. Descritas por Duarte (2018) como:

**ISO 55000** - Visão geral, princípios e terminologia;

**ISO 55001** - Requisitos para um sistema de gestão de ativos;

**ISO 55002** - Diretrizes para a aplicação da ISO 55001.

Definido pela ISO 55000, um ativo pode ser um item, coisa ou entidade que tem valor potencial ou real para uma organização, podendo ser tangível ou intangível, financeiro ou não (J. T. Farinha *et al.*, 2023).

Estas normas formam o primeiro conjunto de normas internacionais que abrangem a implementação de melhores práticas na gestão otimizada de ativos.

A família de normas ISO 55000 é algo recente, pois foram lançadas em 2014, dez anos atrás, e traduzidas para o português apenas em 2016, o que fez alterar sua nomenclatura para NP ISO 55000 (Norma Portuguesa). O surgimento dessas normas foi por conta de uma necessidade internacional de normalização da gestão de ativos nas indústrias.

Antes disso, já se havia gestão de ativos, mas apenas ativos físicos, essa é a principal diferença entre a família de normas ISO 55000 e a sua antecessora, a Publicly Available Specification 55 também conhecida por PAS 55, lançada 10 anos antes das ISO's, em 2004. Trata-se de um documento de consulta, escrito e desenvolvido por um modelo das normas britânicas (Fecha, 2012).

Segundo Poland (2024), o *British Standards Institute* (BSI), em colaboração com o *Institute of Asset Management*, foram os responsáveis por lançar a PAS 55, a primeira especificação reconhecida internacionalmente para gestão de ativos, que foi dividida em duas partes: Parte 1 – Especificação para gestão otimizada de ativos de infraestrutura física, e Parte 2 – Diretrizes para aplicação da PAS 55.

Com base no sucesso e na adoção global da PAS 55, surgiu a necessidade de uma norma internacional que ampliasse e refinasse os conceitos já introduzidos, o que faz da ISO 55000 um upgrade da PAS 55, que serviu como base e referência para o desenvolvimento da série de normas, oferecendo uma estrutura mais abrangente e flexível para a gestão de ativos de diferentes tipos, não apenas físicos, como ilustrado na Figura 27.



Figura 27 - Abrangência da PAS 55, face aos ativos de uma organização.

Fonte: (Fecha, 2012)

Para Fecha (2012), a PAS 55 encontra-se baseada na metodologia PDCA, sendo a implementação da gestão de ativos, resumida através dos passos: 1º Planear, 2º Executar, 3º Verificar e 4º Agir (*Plan, Do, Check, Act*). Onde a descrição dos passos pode ser resumida em:

- Planear: Identificar o problema, estabelecer metas claras e definir o plano de ação;
- Executar: Implementar o plano de ação de acordo com o que foi planejado;
- Verificar: Monitorar e avaliar os resultados obtidos, comparando com as metas estabelecidas no planejamento;
- Agir: Tomar ações corretivas ou preventivas com base nos resultados obtidos na etapa de verificação, visando melhorias contínuas.

De acordo com o trabalho de Fecha (2012), a gestão de ativos pode ser definida como um processo de maximização do retorno de um investimento, através do melhoramento de desempenho e minimização do custo total do ciclo de vida do ativo.

Com os conceitos necessários definidos, falando propriamente sobre o ciclo de vida, ele refere-se ao conjunto de etapas que um produto passa desde sua concepção até o descarte. E as etapas que um ativo atravessa durante seu ciclo de vida incluem:

planeamento, onde será definido os objetivos, especificações e requisitos do produto, seguido pela aquisição, etapa que consiste na obtenção dos materiais e recursos necessários para a produção; a produção/fabrico do produto, sua utilização, que é a fase em que o produto é utilizado pelo consumidor; manutenção: sendo as atividades necessárias para garantir o funcionamento adequado e prolongar a vida útil do produto; e, por fim o seu descarte, que representa o processo final em que o produto é retirado de uso.

Quando Fecha (2012), define a gestão de ativos e inclui a minimização do custo de vida como um dos objetivos, ele se refere a prática de reduzir os custos associados a todas as etapas, isso inclui não apenas os custos de aquisição e instalação, mas também os custos de operação, manutenção e eventual descarte. Por exemplo: implementando práticas de manutenção que prolonguem a vida útil do ativo, pode reduzir a frequência e os custos de substituição de componentes. E através de indicadores é possível fazer escolhas assertivas sobre como e quando investir em reparos, atualizações ou substituições.

Os *Key Performance Indicators* (KPIs) ou Indicadores-Chave de Desempenho, são ferramentas essenciais para avaliar se a gestão de ativos está alcançando os objetivos estabelecidos, especialmente em termos de custos e desempenho operacional. Entre os KPIs mais amplamente utilizados destacam-se o *Mean Time Between Failures* (MTBF) ou Tempo Médio Entre Falhas, que mede a fiabilidade de um ativo por meio do intervalo médio de tempo entre falhas consecutivas; o *Mean Time to Repair* (MTTR), ou Tempo Médio de Reparo, que avalia a eficiência na manutenção, mostrando o tempo médio necessário para restaurar um ativo após uma falha; e o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) ou Eficiência Global do Equipamento, que oferece uma visão holística da eficiência de um equipamento, combinando disponibilidade, desempenho e qualidade.

Segundo J. T. Farinha *et al.* (2023), para alcançar uma economia circular sustentável, é importante maximizar o ciclo de vida de um ativo físico, uma avaliação do ciclo de vida possibilita que o gestor tome decisões referentes a substituição do ativo ou sua permanência em operação, o que possibilita uma redução do desperdício, contribuindo para a sustentabilidade.

A engenharia do ciclo de vida foi introduzida no início da década de 1990 com foco na ecoeficiência, trazendo produtos para reduzir o impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida, mantendo ou aumentando o valor criado com uma perspectiva do berço ao túmulo. Os métodos e ferramentas utilizados na engenharia do ciclo de vida apoiam a redução do impacto ambiental que está associado às mudanças tecnológicas e também ao aumento de volume de fabrico de produtos de uma produção para outra, garantindo que os novos produtos permaneçam dentro dos limites da sustentabilidade ambiental (Kara & Hauschild, 2024).

Um mundo sustentável implica na maximização do Ciclo de Vida de um Ativo Físico, visando o aproveitamento pleno da sua rentabilidade. Saber o momento em que um Ativo Físico chega ao fim da vida útil contribui para a sua utilização máxima,

contribuindo assim para a sustentabilidade, evitando sucateamento produzindo resíduos ou a aquisição antecipada de mais ativos físicos, perdendo dinheiro (J. T. Farinha *et al.*, 2023).

A gestão do ciclo de vida envolve todas as fases, desde o planejamento, compra, operação, manutenção e desativação. Seu objetivo é maximizar o valor dos ativos por meio de ações como análise de custos, monitoramento do desempenho.

Segundo J. T. Farinha *et al.* (2023), a gestão de ativos deve priorizar ações como reparo, reutilização e reciclagem. Essas estratégias são fundamentais para minimizar o uso de recursos, enquanto promovem a durabilidade, o desempenho e a vida útil dos ativos. Tal abordagem, dentro da perspectiva de gestão do Ciclo de Vida, contribui para o desenvolvimento sustentável por meio da economia circular, alinhando-se com o objetivo 11 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que busca garantir cidades e comunidades sustentáveis.

Partindo para a aplicação da análise de ciclo de vida seguindo a abordagem apresentada por J. T. Farinha *et al.* (2023), diversos modelos de avaliação do ciclo de vida de ativos físicos podem ser considerados para a tomada de decisões estratégicas, como o valor de mercado, métodos de depreciação, e a utilização mais generalizada da Equação de Fisher, incluindo a Taxa de Risco, por exemplo:

**Valor de Mercado:** Embora forneça uma visão imediata do valor de um ativo com base no preço de mercado, essa análise não está diretamente ligada ao ciclo de vida do ativo. Ela é mais adequada para determinar o valor de venda ou substituição do ativo em um dado momento, sem considerar o desempenho ou custos acumulados ao longo do tempo. Pode ser utilizado para estimar o valor residual de um ativo ao final de sua vida útil, o que influencia decisões de substituição ou venda.

**Métodos de Depreciação:** Esses métodos avaliam como o valor de um ativo diminui gradualmente ao longo do seu ciclo de vida. Isso acontece devido ao desgaste natural, a obsolescência tecnológica ou diminuição de sua utilidade. São amplamente usados para distribuir o custo do ativo de forma equilibrada durante seu ciclo de vida, permitindo que as empresas identifiquem o momento ideal para a substituição de um ativo.

**Equação de Fisher (com taxa de risco):** Este método avalia o retorno esperado de um ativo considerando a inflação e a taxa de risco, fornecendo uma visão mais realista de sua lucratividade ao longo do tempo. É utilizada para calcular o valor presente de fluxos de caixa futuros, ajustando-os para as incertezas econômicas, como variações na inflação e os riscos associados ao investimento no ativo. Essa abordagem ajuda os gestores a tomar decisões sobre a gestão financeira, identificando se um ativo permanecerá lucrativo ou se é o momento de substituí-lo.

**Uniform Annual Income (UAI) ou Método de Renda Anual Uniforme:** Este método transforma os fluxos de caixa que um ativo gera ao longo do tempo em uma série de rendas anuais iguais, com ou sem ajuste ao valor presente. O UAI ajuda a calcular o retorno anual constante de um ativo, permitindo uma visão clara de seu

desempenho financeiro ao longo do tempo. Essa abordagem é especialmente útil para decidir se é melhor continuar usando o ativo ou substituí-lo, oferecendo uma base sólida para avaliar se vale a pena manter ou trocar ativos.

*Minimization of Total Average Cost Method* (MTAC) ou Método de Minimização do Custo Médio Total: Este método analisa o custo total do período em que a organização detém e opera o ativo ao longo de sua vida útil, com o objetivo de identificar o ponto em que o custo médio total é minimizado. Esse método considera tanto os custos de aquisição quanto os de manutenção e operação, permitindo uma visão abrangente sobre o ciclo de vida econômico do ativo. Ao identificar o ponto de menor custo, o MTAC auxilia na tomada de decisões estratégicas sobre a substituição, manutenção ou renovação do ativo, maximizando a eficiência e minimizando despesas desnecessárias.

*Life Cycle Investment* (LCI) ou Investimento no Ciclo de Vida: Este método analisa todos os custos relacionados a um ativo desde sua compra até seu descarte, englobando aspectos como operação, manutenção e eliminação. Através dessa abordagem, é possível estimar o Retorno Total sobre o Investimento (ROI) de um ativo, levando em conta o custo-benefício ao longo de sua vida útil. O LCI fornece uma visão abrangente sobre os gastos envolvidos e ajuda a identificar se o ativo é financeiramente viável ao longo do tempo, apoiando decisões estratégicas sobre investimentos futuros.

*Life Cycle of Physical Assets with Recovery* (LCR) ou Ciclo de Vida de Ativos Físicos com Recuperação (LCR): Este método concentra-se na recuperação de valor através da reciclagem, reutilização ou recuperação de componentes ao final da vida útil do ativo. Sua aplicação visa aumentar a sustentabilidade e minimizar o desperdício de recursos, promovendo práticas que favorecem a economia circular. Ao maximizar o uso de materiais existentes, o LCR contribui para a redução de impactos ambientais e otimiza o ciclo de vida dos ativos.

Esses modelos de acordo com J. T. Farinha *et al.* (2023), fornecem uma base sólida para avaliar e comparar o desempenho dos ativos ao longo de seu ciclo de vida considerando os principais parâmetros de análise:

- Investimento Inicial (II): Capital necessário para adquirir e instalar o ativo.
- Tempo de vida simulado (em anos): Estimativa da duração de um ativo ao longo de seu ciclo de vida.
- Valor Residual (VR): Valor do ativo ao final de sua vida útil.
- Custos de funcionamento (F): Custos associados ao funcionamento regular do ativo, despesas operacionais.
- Despesas Energéticas (E): Custo da energia utilizada durante a operação.
- Despesas de Manutenção (M): Custos de reparos e manutenções ao longo da vida útil.

- Benefícios (B): Ganhos gerados pelo ativo.
- Taxa Interna de Retorno (TIR): Métrica financeira que mede a rentabilidade do investimento.
- Risco (R): A incerteza associada ao desempenho e longevidade do ativo.
- Taxa Aparente (IA): Relaciona-se com a depreciação e custo de oportunidade.
- *Mean Time Between Failures* (MTBF): Tempo médio entre falhas.
- *Mean Time to Repair* (MTTR): Tempo médio para reparo.
- *Mean Waiting Time* (MWT): Tempo médio de espera até a conclusão do reparo.

A aplicação de diferentes modelos oferece maior precisão nessa determinação, já que os resultados podem variar ligeiramente entre as abordagens, o que ressalta a importância de utilizar múltiplos métodos para fundamentar uma decisão bem-informada. Assim, tomando ainda como base o trabalho de J. T. Farinha *et al.* (2023) foram escolhidos 4 modelos de seguimentos distintos para avaliação do ciclo de vida de ativos físicos, com o objetivo de diminuir o desperdício e aumentar a sustentabilidade, situação que aplica-se ao contexto dessa dissertação.

### 2.6.1 Uniform Annual Income (UAI)

Categorizado como um método de depreciação, o UAI é usado para estimar a renda anual necessária para recuperar um dado investimento. Como o próprio nome diz, a renda anual precisa ser uniforme para simplificar a análise e facilitar a comparação ao longo do tempo. Ao garantir que a renda anual seja constante, torna-se mais fácil calcular a quantidade total necessária para recuperar o investimento e avaliar a viabilidade financeira. Esse método leva em consideração vários fatores como despesas, taxa de inflação e outros impostos.

Existem dois métodos de aplicação da UAI, com redução do valor presente e sem redução do valor presente. Mas antes de falar propriamente de cada variação, é necessário definir o conceito de valor presente, encontrado nas literaturas como Valor Presente Líquido (VPL) ou Valor Atual Líquido (VAL).

O dinheiro no presente tem mais valor do que no futuro, devido a fatores como a inflação. Por exemplo, o que poderia ser comprado com 50,00 € no supermercado há dois anos não é o mesmo que se pode adquirir hoje com esse valor. Isso demonstra que um montante recebido no futuro não tem o mesmo valor de um montante recebido atualmente. De acordo com Stumpf (2023), o conceito, chamado Valor Presente (VP), ajusta um fluxo de caixa futuro considerando a desvalorização ao longo do tempo e pode ser definido matematicamente pela uma equação (1):

$$VP = \frac{VF}{(1 + i)^t} \quad (1)$$

Onde:

*VP*: Valor presente;

*VF*: Valor futuro;

*i*: Taxa de juros vigente;

*t*: Tempo entre o primeiro e segundo período.

Por exemplo:

É previsto para 2028 que o salário mínimo português, alcance 1.020,00€. Através da equação do Valor Presente, consigo verificar se atualmente esse salário corresponderia ao valor de 870,00€ previstos para o ano de 2025. (Patrício, 2024).

De acordo com o Banco de Portugal (2024), nos próximos 3 anos, considerando a inflação atual de 2,5% ao aplicar os valores, na equação (2) é obtido o valor de 947,17€ superior aos 870,00€ atuais, ou seja, mesmo com a inflação, o salário cresce e aumenta o poder de compra.

$$VP = \frac{1020}{(1 + 0,025)^3} = 947,17 \quad (2)$$

Com o conceito definido é possível explorar as variações do UAI, com e sem a redução do Valor Presente.

De forma simples, o UAI com redução ao Valor Presente, calcula quanto dinheiro você precisa anualmente para recuperar um investimento, considerando o tempo e como o dinheiro perde valor com o tempo.

Já o UAI sem redução ao Valor Presente, distribui os custos uniformemente ao longo dos anos, sem considerar essa perda de valor. Portanto, no primeiro método, o tempo e a depreciação do dinheiro são importantes, enquanto no segundo método, isso não é levado em consideração. Por exemplo:

Considerando um investimento em painéis fotovoltaicos com um custo inicial de 10.000,00 €, e assumindo a recuperação desse valor em 5 anos com uma taxa anual de inflação de 5%, o método da Renda Anual Uniforme tem como objetivo calcular o retorno anual necessário para atingir essa meta de recuperação. Em outras palavras, ele determina o valor fixo, corrigido pela inflação, que o ativo deve gerar anualmente para que o planejamento financeiro seja cumprido.

A equação (3), descreve matematicamente essa situação:

$$VP = \frac{R}{(1+i)^1} + \frac{R}{(1+i)^2} + \frac{R}{(1+i)^3} + \frac{R}{(1+i)^4} + \frac{R}{(1+i)^5} \quad (3)$$

onde:

*VP* é o valor presente (10.000 €);

*R* é a renda anual que pretende-se encontrar;

$i$  é a taxa de inflação (5% ou 0,05).

Ao reorganizar a equação de modo que encontre-se o  $R$ , o valor obtido é 2.309,40€ que representa a renda anual necessária para recuperar o investimento inicial, levando em conta a desvalorização do dinheiro ao longo do tempo devido à inflação.

Sem levar em conta o valor presente ou qualquer taxa de desconto, a recuperação do investimento pode ser calculada de forma simples, dividindo o valor total do ativo pela quantidade de anos desejada para o retorno. Nesse caso, o resultado representa a renda anual necessária sem considerar os efeitos da inflação ou da desvalorização do dinheiro ao longo do tempo.

Aplicando na equação (4), o mesmo investimento de 10.000,00 € com o retorno de 5 anos.

$$R = \frac{\text{Valor Total}}{\text{Número de Anos}} = \frac{10000}{5} = 2000\text{€} \quad (4)$$

A renda anual necessária para recuperar o investimento de 10.000,00 € em 5 anos, sem considerar valor presente, seria de 2.000 € por ano.

Saber o valor de retorno anual é crucial para avaliar o ciclo de vida de um ativo, pois permite medir seu desempenho financeiro ao longo do tempo. Esse retorno ajuda a comparar o desempenho real com as expectativas, indicando se o ativo ainda gera lucro ou se está se desvalorizando. Além disso, facilita a tomada de decisões sobre substituição, uma vez que um retorno abaixo do esperado pode justificar a troca por alternativas mais lucrativas. Assim, o retorno anual serve como um guia essencial para planejar investimentos futuros e avaliar riscos associados ao ativo, garantindo uma gestão mais eficaz.

O UAI representa a quantia fixa que se espera receber anualmente, com base no investimento inicial e no período. Esse valor não muda. Entretanto a rentabilidade real pode ser afetada por fatores como desvalorização do ativo, aumento de custos ou redução nos fluxos de caixa. Embora a renda anual seja constante, se o valor do ativo cair, o retorno percentual em relação ao investimento inicial diminuirá.

Para obter cálculos mais precisos no método de renda anual uniforme, as equações tornam-se mais complexas com a inclusão da equação de Fisher. Esta equação estabelece como diferentes fatores econômicos se relacionam para formar uma taxa efetiva que reflete as condições de mercado, sendo amplamente utilizada em avaliações financeiras e de investimentos. Ela relaciona as taxas de juros, inflação e outras variáveis econômicas, como a taxa de lucro e a taxa de risco, no cálculo da Taxa Aparente.

Matematicamente a Equação de Fisher é expressa pela equação (5):

$$(1 + i_A) = (1 + r) \times (1 + h) \times (1 + P) \times (1 + R) \quad (5)$$

Onde:

$i_A$  é a Taxa Aparente;

$r$  é a Taxa de Juros Real;

$h$  é a Taxa de Inflação;

$P$  é a Taxa de Lucro;

$R$  é a Taxa de Risco.

A partir da Taxa Aparente, que engloba todas as outras, o método de Renda Anual Uniforme, incluindo a Redução ao Valor Presente, é dado pela equação (6) (J. T. Farinha *et al.*, 2023).

$$UAI_N = \frac{iA(1+iA)^n}{(1+iA)^n - 1} \times PNV_n \quad (6)$$

Na qual o  $PNV_n$  (Valor Presente Líquido) é dado pela equação (7):

$$PNV_n = II + \sum_{j=0}^n \frac{CM_j + CO_j}{(1+iA)^j} - \frac{V_n}{(1+iA)^n} \quad (7)$$

Onde:

$II$  = Investimento Inicial

$CM_j$  = Custo de Manutenção no ano  $j$

$CO_j$  = Custo de operação no ano  $j$

$iA$  = Taxa Aparente

$V_n$  = Valor do equipamento após um período  $n$

### **2.6.2 Minimization of Total Average Cost Method (MTAC)**

Classificado como um método de avaliação de custos, o *Minimization of Total Average Cost Method* ou Método de Minimização do Custo Médio Total (MTAC) irá analisar o custo total de propriedade e operação de um ativo.

O custo de posse e operação incluem as despesas associadas ao uso e funcionamento de um ativo, isso abrange gastos com energia, combustível, salários dos operadores, materiais de consumo, serviços auxiliares como água e gás, substituição de peças e ajustes regulares.

De forma simplificada, um exemplo pode ser descrito a partir do conceito teórico, abrangendo a temática das energias renováveis.

Exemplo:

Uma empresa instalou um sistema de painéis solares fotovoltaicos com capacidade de 5 kW, investindo 7.000,00€ na instalação, com expectativa de vida útil de 20 anos.

No entanto, a empresa enfrentou um aumento inesperado nos custos de manutenção, inicialmente estimados em 400,00€, mas devido a falhas recorrentes e o desgaste acelerado dos componentes, desde o ano 3 esses custos aumentaram em 35€ por ano.

Além disso, as economias geradas pela redução na compra de eletricidade da rede, que eram de 1.500,00€ anuais, a partir do segundo ano começaram a cair devido a um aumento nas tarifas de eletricidade de 1,5% ao ano.

Para auxiliar na identificação dos dados, elaborou-se a Tabela 4, na qual são apresentados os valores obtidos e suas variações ao longo dos anos. Sendo o Custo Total e o Custo Médio Total definidos pelas equações 8 e 9:

$$\text{Custo Total} = \text{Custo Acumulado} - \text{Retorno Financeiro}_* \quad (8)$$

$$\text{Custo Médio Total} = \frac{\text{Custo Total}}{\text{Número de Anos}} \quad (9)$$

Apesar de considerar o custo acumulado ao longo dos anos, no retorno financeiro é utilizado apenas o correspondente aquele período.

Tabela 4 - Minimização do Custo Médio Total.

Ano	Custo de Manutenção (€)	Retorno Financeiro Ajustado (€)	Custo Acumulado (€)	Custo Total (€)	Custo Medio Total (€)
1	400,0	1500,00	7400,0	5900,00	5900,00
2	400,0	1477,50	7800,0	6322,50	3161,25
3	435,0	1455,34	8235,0	6779,66	2259,89
4	470,0	1433,51	8705,0	7271,49	1817,87
5	505,0	1412,00	9210,0	7798,00	1559,60
6	540,0	1390,82	9750,0	8359,18	1393,20
7	575,0	1369,96	10325,0	8955,04	1279,29
8	610,0	1349,41	10935,0	9585,59	1198,20
9	645,0	1329,17	11580,0	10250,83	1138,98
10	680,0	1309,23	12260,0	10950,77	1095,08
11	715,0	1289,60	12975,0	11685,40	1062,31
12	750,0	1270,25	13725,0	12454,75	1037,90
13	785,0	1251,20	14510,0	13258,80	1019,91
14	820,0	1232,43	15330,0	14097,57	1006,97
15	855,0	1213,94	16185,0	14971,06	998,07
16	890,0	1195,73	17075,0	15879,27	992,45
17	925,0	1177,80	18000,0	16822,20	989,54
18	960,0	1160,13	18960,0	17799,87	988,88
19	995,0	1142,73	19955,0	18812,27	990,12
20	1030,0	1125,59	20985,0	19859,41	992,97

O Custo Médio Total (CMT), que representa o custo médio por ano acumulado em relação ao total de anos, atingiu 988,88€ no ano 18. Este valor é o mais baixo durante todo o período de análise, indicando que a eficiência do ativo em termos de custo está no seu pico.

Após o Ano 18, observa-se uma leve elevação nos valores do CMT, que passa para 990,12€ no Ano 19 e 992,97€ no ano 20. Essa tendência de aumento sugere que os custos de manutenção estão tornando-se mais altos em relação ao retorno financeiro proporcionado pelo ativo, o que indica uma diminuição da eficiência ao longo do tempo.

A substituição do ativo no ano 18 é uma decisão estratégica vantajosa, mesmo considerando que a vida útil total do equipamento é de 20 anos. Embora o ativo ainda tenha um desempenho funcional, os dados mostram que os custos de manutenção aumentam progressivamente ao longo dos anos, enquanto o retorno financeiro ajustado tende a diminuir.

Ao optar pela substituição, a empresa evita custos crescentes associados a um ativo mais antigo, que podem afetar sua rentabilidade. Se a empresa continuar a utilizar o equipamento até o fim de sua vida útil, os custos de manutenção continuarão a crescer, potencialmente superando os benefícios financeiros obtidos.

O Gráfico 1, do Custo Médio Total (CMT) ao longo dos anos mostra claramente como o custo médio anual do ativo se comporta ao longo de sua vida útil. No início, o CMT é mais elevado, pois reflete o impacto dos custos iniciais de aquisição e instalação, que ainda estão sendo amortizados. Com o passar dos anos, observa-se uma redução no CMT, até atingir seu ponto mais baixo no ano 18, que marca o momento de maior eficiência do ativo em termos de custo. Após esse ponto, há um aumento gradual do CMT, resultado do crescimento dos custos de manutenção em relação ao retorno financeiro gerado. Esse comportamento sugere que o ano 18 é o momento ideal para a substituição do ativo, pois, a partir desse momento, os custos começam a superar os benefícios, comprometendo a viabilidade financeira da operação.

Para identificar melhor a variação no comportamento da curva, o Gráfico 2 é apresentado a partir do ano 10, quando a amplitude do Custo Médio Total torna-se menos acentuada. Assim, é possível observar de forma mais clara o ponto mínimo no ano 18 e o leve aumento a partir desse ponto, evidenciando que este é o momento ideal para a substituição do ativo, antes que os custos de manutenção superem os benefícios financeiros.

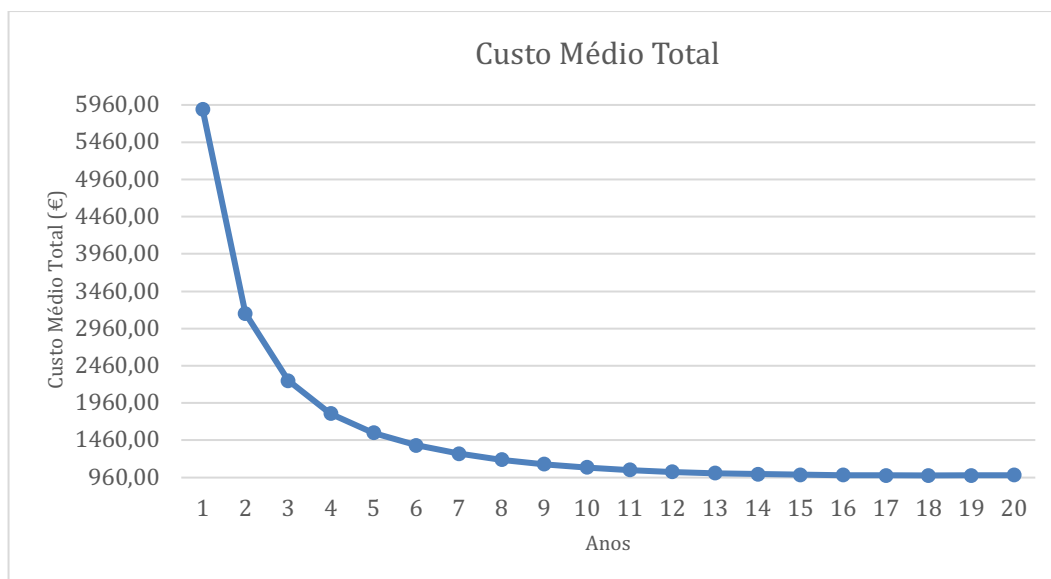


Gráfico 1 - Custo Médio Total ao longo da vida útil de 20 anos.

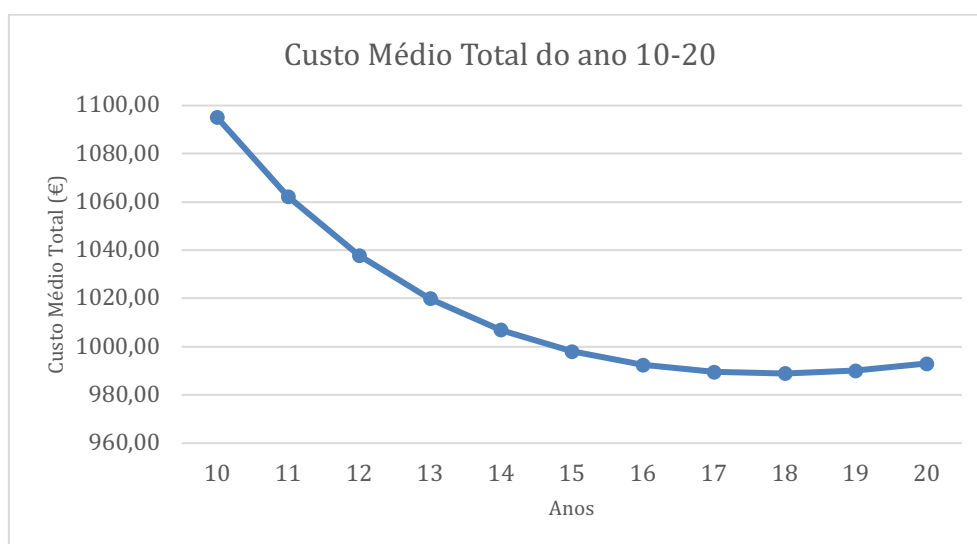


Gráfico 2 - Custo Medio Total ampliado a partir do ano 10.

Outra análise possível com os dados em tabela, é referente ao *payback*, Tabela 5. Acrescentando uma coluna com o acúmulo do retorno financeiro é possível comparar retorno vs. custo e determinar se o ativo gera lucro ou prejuízo. Observando essa comparação ao longo dos anos, nota-se que, no ano 8, o retorno acumulado superou o custo acumulado.

Tabela 5 – *Payback*.

Ano	Custo de Manutenção (€)	Retorno Financeiro Ajustado (€)	Custo Acumulado (€)	Retorno acumulado (€)	Resultado Líquido (€)
1	400,0	1500,00	7400,0	1500,00	5900,00
2	400,0	1477,50	7800,0	2977,50	4822,50
3	435,0	1455,34	8235,0	4432,84	3802,16
4	470,0	1433,51	8705,0	5866,34	2838,66
5	505,0	1412,00	9210,0	7278,35	1931,65
6	540,0	1390,82	9750,0	8669,17	1080,83
7	575,0	1369,96	10325,0	10039,14	285,86
8	610,0	1349,41	10935,0	11388,55	-453,55
9	645,0	1329,17	11580,0	12717,72	-1137,72
10	680,0	1309,23	12260,0	14026,96	-1766,96
11	715,0	1289,60	12975,0	15316,55	-2341,55
12	750,0	1270,25	13725,0	16586,80	-2861,80
13	785,0	1251,20	14510,0	17838,00	-3328,00
14	820,0	1232,43	15330,0	19070,43	-3740,43
15	855,0	1213,94	16185,0	20284,37	-4099,37
16	890,0	1195,73	17075,0	21480,11	-4405,11
17	925,0	1177,80	18000,0	22657,91	-4657,91
18	960,0	1160,13	18960,0	23818,04	-4858,04
19	995,0	1142,73	19955,0	24960,77	-5005,77
20	1030,0	1125,59	20985,0	26086,36	-5101,36

O resultado líquido até esse ponto representava o quanto do valor investido ainda restava ser recuperado e no ponto 8 fica negativo, representando que já não há dívida e sim lucro. Em outras palavras, o investimento, incluindo todas as despesas, foi recuperado, tornando o ano 8 o *payback* desse ativo.

Essa situação pode ser observada também no Gráfico 3 quando a linha do Custo Acumulado é cruzada pela linha do Retorno Financeiro Acumulado, indicando o ponto de *payback*. Antes desse ponto, a linha do Custo Acumulado está acima da linha do Retorno Financeiro Acumulado, sinalizando que os custos superam os benefícios, enquanto após o cruzamento, a linha do Retorno Financeiro Acumulado se torna superior, evidenciando que o investimento foi recuperado e passa a ser rentável.

Apesar do custo do equipamento já ter sido amortizado no ano 8, mantê-lo em operação além do ano 18 pode reduzir o lucro, pois os custos de manutenção se tornam maiores do que o retorno gerado. Isso significa que, no longo prazo, não haveria um prejuízo direto, mas a rentabilidade diminuirá.

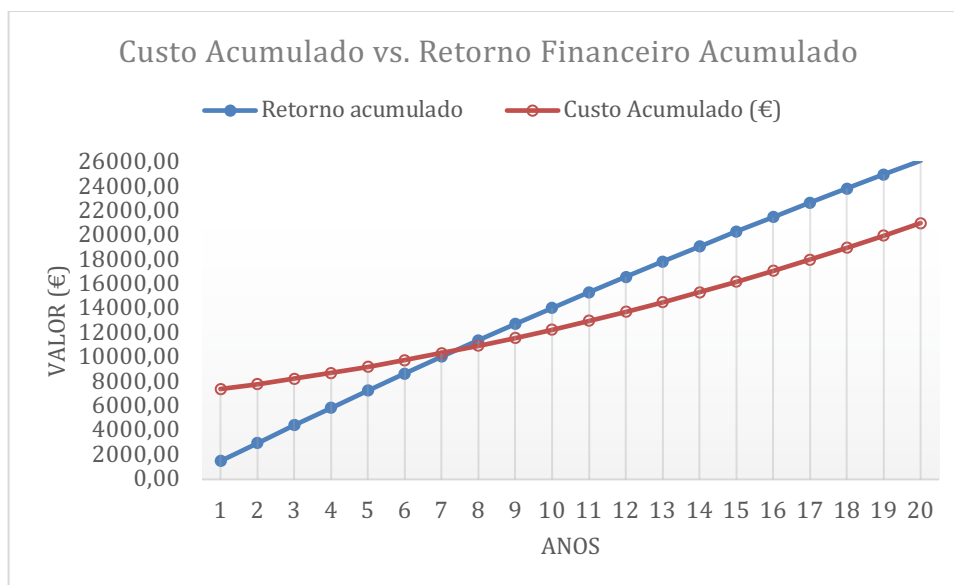


Gráfico 3 - Custo Acumulado vs. Retorno Financeiro Acumulado.

Substituir o ativo no ano 18 é uma decisão estratégica para maximizar o retorno sobre o investimento e evitar custos crescentes de manutenção. Embora o equipamento tenha sido lucrativo desde o ano 8, sinais de ineficiência começam a aparecer no ano 18, tornando a substituição uma medida eficaz para garantir o uso otimizado dos recursos da empresa e manter sua lucratividade elevada.

A equação (10), Custo Médio Total (CMT) incluindo a taxa aparente para consideração de outras variáveis economias, é descrita no trabalho de J. T. Farinha *et al.* (2023) como:

$$CMT = \frac{1}{n} \left( II - \frac{V_n}{(1 + i_A)^n} + \sum_{j=1}^n \frac{CM_j + CO_j}{(1 + i_A)^j} \right) \quad (10)$$

Onde:

$II$  é o investimento inicial;

$V_n$  é o valor residual do equipamento ao final do período  $n$ ;

$i_A$  é a taxa de juros aparente;

$CM_j$  é o custo de manutenção no ano  $j$ ;

$CO_j$  é o custo de operação no ano  $j$ ;

$n$  é o número de anos.

### 2.6.3 Life Cycle Investment (LCI)

O LCI é classificado como um Método de Avaliação de Investimentos, é uma abordagem que avalia o desempenho financeiro de um ativo ao longo de toda a sua

vida útil, considerando os custos associados desde sua aquisição até o descarte. Isso inclui despesas de operação, manutenção, e até o custo de eliminação do ativo. De forma semelhante ao método anterior o MTAC, ambos os métodos analisam os custos totais associados durante o ciclo de vida do ativo, incluindo operação, manutenção e eliminação. Mas, enquanto o MTAC concentra-se na minimização do custo médio total e na identificação do momento ideal para a substituição do ativo, focando na eficiência de custo e na otimização do uso do ativo ao longo do tempo. O LCI, se direciona a análise do retorno total sobre o investimento (ROI), levando em conta todos os custos e benefícios ao longo da vida do ativo.

O Retorno sobre o Investimento ou *Return on investment* (ROI) é uma métrica financeira que avalia a eficiência e a rentabilidade de um investimento em relação ao seu custo. Ele é expresso como uma porcentagem, obtida pelo quociente entre ganho líquido e custo do investimento, calculado pela equação:

$$ROI = \left( \frac{\text{Retorno do Investimento} - \text{Custo do Investimento}}{\text{Custo do Investimento}} \right) \quad (10)$$

A interpretação do ROI é feita buscando valores cada vez maiores, ao serem comparados diferentes investimentos o maior ROI representa aquele que é mais rentável. Por exemplo:

Um ROI positivo de 20% significa que por exemplo, na equação 11, para cada €100 investidos, houve um ganho de 20€.

$$ROI = 20\% = \left( \frac{120 - 100}{100} \right) \times 100 \quad (11)$$

Um ROI de 0% significa que o investimento não teve lucro nem prejuízo. O retorno gerado é exatamente igual ao custo do investimento, ou seja, para cada €100 investidos, não houve nenhum ganho, equação (12).

$$ROI = 0\% = \left( \frac{100 - 100}{100} \right) \times 100 \quad (12)$$

Enquanto um ROI negativo de -10%, indica que o investimento gerou menos retorno do que o custo. Significa que, para cada €100 investidos, houve uma perda de €10, equação 13.

$$ROI = -10\% = \left( \frac{90 - 100}{100} \right) \times 100 \quad (13)$$

Ao calcular o ROI com base nos custos e benefícios, utilizando o LCI é possível determinar se um ativo é financeiramente viável, considerando o seu custo-benefício ao longo do tempo, auxiliando gestores a tomarem decisões estratégicas sobre quando substituir, reparar ou investir em novos ativos, otimizando o uso de recursos. O LCI é útil para prever o impacto financeiro a longo prazo e garantir que o retorno seja suficiente para justificar o investimento, apoiando a planeamento econômico de maneira mais sustentável e eficiente.

De forma simplificada, uma situação fictícia adequada ao contexto do trabalho pode ser apresentada para cálculo e interpretação do LCI. Em uma habitação será instalado um sistema de aquecimento solar térmico, que requer o investimento inicial de 5.000,00€ para o fornecimento e instalação dos painéis solares e acessórios. Espera-se uma redução de 70% na fatura de energia elétrica, que atualmente paga-se em média 1.200,00€ por ano. Os custos adicionais são estimados em 100,00€ anuais para manutenção e 500,00€ para o seu descarte ao fim da vida útil estimada em 20 anos. Os valores do problema foram descritos na Tabela 6, de forma a facilitar a interpretação e análise.

Tabela 6 - Dados do problema.

Item	Valor (€)	Descrição
Aquisição	5000,00	Pagamento único (fornecimento e instalação)
Retorno	840,00	70% do valor anual em faturas de eletricidade
Manutenção	100,00	Pagamento anual
Descarte	500,00	Pagamento único ao fim da vida útil
Vida Útil	-	20 anos

A análise o LCI é feita considerando os custos e retornos financeiros do ativo.

Custos:

- Aquisição: €5.000
- Manutenção (20 anos): €100 x 20 = €2.000
- Descarte: €500
- Totalizando 7.500,00 € em custos

Retorno financeiro:

- Economia Anual em Energia (20 anos): €840 x 20 = €16.800

Para o cálculo do ROI, aplicando os valores na equação (14), obtém-se:

$$ROI = 124\% = \left( \frac{16.800 - 7.500}{7.500} \right) \times 100 \quad (14)$$

Como o LCI é a abordagem que fundamenta a análise do ROI, nesse exemplo o ROI positivo e elevado sinaliza que o investimento é financeiramente viável, demonstrando que os benefícios acumulados ao longo do tempo, como a economia de energia, superam significativamente os custos envolvidos, como a aquisição e manutenção do sistema. Um retorno financeiro de 124% ao longo de 20 anos evidencia que o sistema não apenas gera economia de energia, mas também oferece um retorno expressivo ao longo de sua vida útil.

Ao analisar o problema, com base na Tabela 7 e Gráfico 4. é possível afirmar que quanto maior a vida útil do ativo, maior será o Retorno sobre o Investimento (ROI). Isso ocorre porque o aumento da economia acumulada ao longo do tempo supera

significativamente o crescimento dos custos acumulados. Como resultado, essa relação gera rendimentos mais elevados, refletindo uma eficiência maior na utilização do ativo e, conseqüentemente, uma valorização do investimento inicial.

Tabela 7 - ROI anual.

Ano	Custos (€)	Custo Acumulado (€)	Economia Acumulada (€)	ROI	Observação
1	100	5100	840	-83,53%	Economia < Custo
2	100	5200	1680	-67,69%	Economia < Custo
3	100	5300	2520	-52,45%	Economia < Custo
4	100	5400	3360	-37,78%	Economia < Custo
5	100	5500	4200	-23,64%	Economia < Custo
6	100	5600	5040	-10,00%	Economia < Custo
7	100	5700	5880	3,16%	Economia > Custo
8	100	5800	6720	15,86%	Economia > Custo
9	100	5900	7560	28,14%	Economia > Custo
10	100	6000	8400	40,00%	Economia > Custo
11	100	6100	9240	51,48%	Economia > Custo
12	100	6200	10080	62,58%	Economia > Custo
13	100	6300	10920	73,33%	Economia > Custo
14	100	6400	11760	83,75%	Economia > Custo
15	100	6500	12600	93,85%	Economia > Custo
16	100	6600	13440	103,64%	Economia > Custo
17	100	6700	14280	113,13%	Economia > Custo
18	100	6800	15120	122,35%	Economia > Custo
19	100	6900	15960	131,30%	Economia > Custo
20	600	7500	16800	124,00%	Economia > Custo

Com base na Tabela 7 e no Gráfico 4, outra informação que pode ser extraída através do cálculo individual do Retorno sobre o Investimento (ROI) a cada ano do ciclo de vida é o tempo de *payback*. Esse ponto é alcançado no ano 7, quando a economia acumulada atinge 5.880€, superando o custo acumulado de 5.700€.

No exemplo simplificado apresentado, não foram levadas em conta as situações reais que podem impactar a análise do investimento, como a desvalorização do ativo ao longo do tempo, o aumento dos custos de manutenção e a diminuição da economia gerada devido à obsolescência do sistema. Se os custos aumentam e o ROI diminui, isso pode indicar que a substituição do ativo é uma decisão estratégica vantajosa para manter a eficiência financeira e maximizar o retorno sobre o investimento.

Se os custos aumentam e o ROI diminui, isso pode indicar que a substituição do ativo é uma decisão estratégica vantajosa para manter a eficiência financeira e maximizar o retorno sobre o investimento.

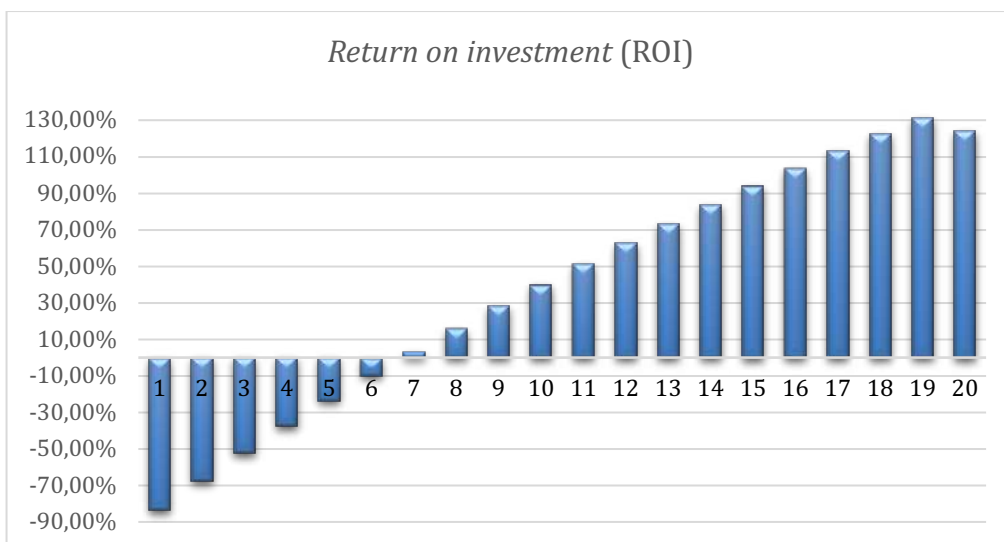


Gráfico 4 - ROI anual para um período de 10 anos.

Outro tipo de análise pode ser feita considerando a situação:

Com o surgimento de avarias constantes, há a necessidade de substituir uma peça a cada três anos, resultando em um custo de 50 euros a cada substituição. Além disso, o custo de manutenção aumenta em 15% ao ano, e a eficiência do sistema diminui em 4% anualmente. Calculando os mesmos indicadores por ano, obtém-se a Tabela 8 que ao ser analisada juntamente com o Gráfico 5, nota-se com aumenta do custo acumulado, o ano de *payback* muda do ano 7 para o ano 9. Até esse ponto, o cenário é favorável, pois o investimento gera um retorno suficiente para cobrir seus custos.

Tabela 8 - ROI anual aplicado a um cenário de aumento de custos.

Ano	Custos	Subst. Peça (€)	Custo Acumulado (€)	Economia Acumulada (€)	ROI	Observação
1	100,0		5100,0	840,0	-83,53%	Economia < Custo
2	115,0		5215,0	1612,8	-69,07%	Economia < Custo
3	132,3	50	5397,3	2419,2	-55,18%	Economia < Custo
4	152,1		5549,3	3225,6	-41,87%	Economia < Custo
5	174,9		5724,2	4032,0	-29,56%	Economia < Custo
6	201,1	50	5975,4	4838,4	-19,03%	Economia < Custo
7	231,3		6206,7	5644,8	-9,05%	Economia < Custo
8	266,0		6472,7	6451,2	-0,33%	Economia < Custo
9	305,9	50	6828,6	7257,6	6,28%	Economia > Custo
10	351,8		7180,4	8064,0	12,31%	Economia > Custo
11	404,6		7584,9	8870,4	16,95%	Economia > Custo
12	465,2	50	8100,2	9676,8	19,46%	Economia > Custo
13	535,0		8635,2	10483,2	21,40%	Economia > Custo
14	615,3		9250,5	11289,6	22,04%	Economia > Custo
15	707,6	50	10008,0	12096,0	20,86%	Economia > Custo
16	813,7		10821,7	12902,4	19,23%	Economia > Custo
17	935,8		11757,5	13708,8	16,60%	Economia > Custo
18	1076,1	50	12883,6	14515,2	12,66%	Economia > Custo
19	1237,5		14121,2	15321,6	8,50%	Economia > Custo
20	1423,2		15544,4	16128,0	3,75%	Economia > Custo

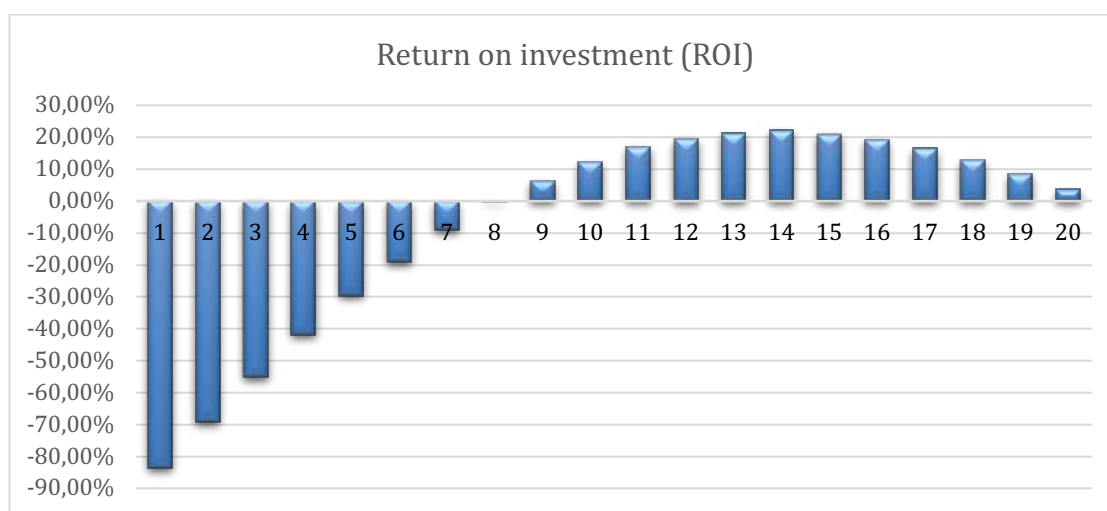


Gráfico 5 - ROI anual para o mesmo período em um cenário de aumento de custos.

A nível de comparação, sobrepondo as duas tendências, no Gráfico 6 é observado o declínio do ROI, que atinge seu máximo no ano 14. Esse declínio é resultado do aumento dos gastos e da diminuição da eficiência do sistema. Apesar de os

rendimentos ainda serem positivos, a queda do ROI indica a necessidade de substituir o ativo. Essa análise é semelhante à realizada no método MTAC.

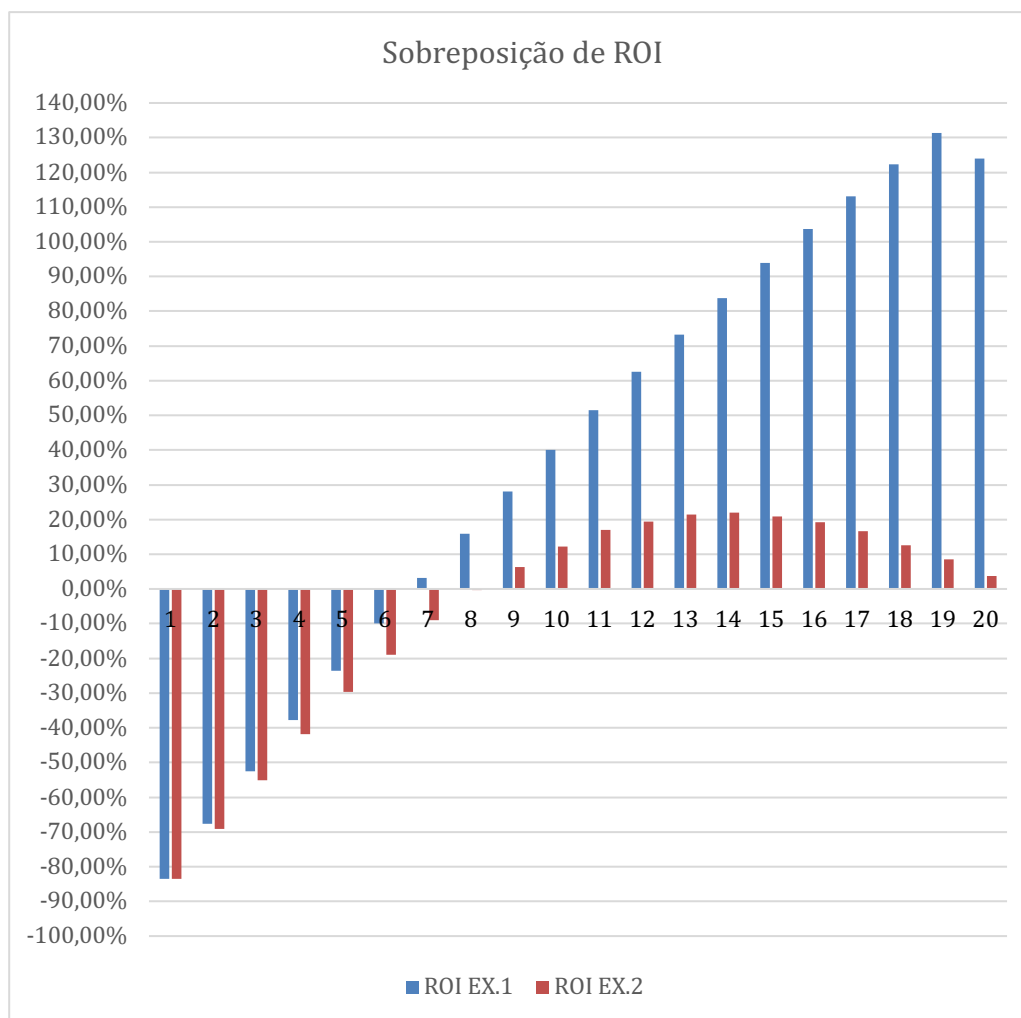


Gráfico 6 - Comparação dos dois cenários de ROI por meio da sobreposição gráfica.

#### 2.6.4 Life Cycle of Physical Assets with Recovery (LCR)

Em sua tradução para língua portuguesa, o Ciclo de Vida de Ativos Físicos com Recuperação, é um método voltado para a sustentabilidade, que foca na recuperação de valor ao final da vida útil de um ativo físico, por meio de reciclagem, reutilização ou recuperação de componentes. O LCR promove a economia circular ao priorizar o reaproveitamento dos materiais já existentes, minimizando o desperdício de recursos e reduzindo a necessidade de novos insumos. Essa abordagem é importante para prolongar o ciclo de vida dos ativos, otimizando seu uso e reduzindo impactos ambientais associados à produção e descarte de novos recursos.

Com a aplicação do LCR, práticas como a reparação de peças, recuperação de materiais valiosos e o reaproveitamento de componentes ganham destaque. Isso não apenas diminui o volume de resíduos descartados, mas também reduz o custo total

de propriedade de um ativo ao longo do tempo, pois prolonga a sua utilização e aproveita ao máximo seus recursos.

Em termos de benefícios para a sustentabilidade, o LCR contribui significativamente para a preservação ambiental ao diminuir a extração de matérias-primas e o consumo energético envolvido no fabrico de novos ativos. Além disso, ele incentiva uma mudança cultural nas empresas, voltada para a responsabilidade ambiental e a adoção de práticas que maximizam o valor dos ativos e minimizam os danos ao meio ambiente.

Embora o LCR ofereça benefícios, também existem cenários em que a substituição dos ativos pode ser a melhor opção. Um dos principais fatores a considerar é o envelhecimento tecnológico. Com o avanço constante das tecnologias, novos ativos podem proporcionar uma maior eficiência e requerer menos manutenção do que os modelos mais antigos e nesses casos a troca pode ser mais vantajosa.

Outro aspecto relevante é o custo-benefício de manutenção. À medida que os ativos envelhecem, os custos de manutenção podem se acumular, tornando a substituição necessária se esses custos tornarem-se excessivos e impactarem a rentabilidade. Além disso, restrições regulatórias e incentivos governamentais podem influenciar a decisão de substituição. Programas de incentivos para novas tecnologias ou normas que exijam eficiência mínima podem tornar a troca mais atraente.

A deterioração estrutural irreversível também é uma razão importante para considerar a substituição. Quando componentes críticos de um ativo não podem ser recuperados de maneira econômica, a troca torna-se inevitável. Mudanças nas demandas do mercado podem exigir ativos mais eficientes para atender às novas necessidades. Por fim, se uma empresa tem planos de expansão ou diversificação, substituir ativos pode ser parte de uma estratégia para aumentar a competitividade e obter economias de escala.

Portanto, a decisão entre substituir ou recuperar deve ser fundamentada em uma análise cuidadosa das condições técnicas, econômicas e de desempenho, considerando o ciclo de vida do ativo e as condições de mercado. A substituição, embora menos sustentável em algumas perspectivas, pode ser a escolha mais viável em determinadas situações.

Um exemplo prático de análise da aplicação de LCR, é apresentado a seguir em um contexto de energias renováveis, focado em um Parque Eólico onde uma empresa opera dez aerogeradores. Após 25 anos de operação, é preciso tomar uma decisão crucial sobre o futuro dos aerogeradores, que estão a aproximar-se do fim de sua vida útil. As opções a serem consideradas são descartar os aerogeradores antigos por conta dos gastos anuais com custos operacionais, que chegam a custar em média 100.000,00€ anuais a empresa.

Descartando os antigos aerogeradores, o custo para fornecimento e instalação de novos são 3 milhões de euros. A outra opção seria não descartar em sua totalidade, mas reaproveitar componentes e materiais, prolongando a vida útil desses.

Antes da decisão, a empresa realiza uma avaliação detalhada dos aerogeradores, onde engenheiros analisam cada componente entre: torres, geradores, hélices e sistemas elétricos, para determinar quais ainda estão em boas condições e podem ser reutilizados.

A estrutura da torre estando intacta e não apresentando problemas estruturais, ela pode ser mantida. Nesse caso, contrariamente a construção de uma nova torre, a empresa pode apenas substituir a parte superior do aerogerador (gerador e hélices), que é onde ocorre a maior parte do desgaste.

Se o gerador ainda funciona bem, ele pode ser reaproveitado em um novo aerogerador. Caso contrário, a empresa pode reciclar as peças.

Caso as hélices não estiverem danificadas, a empresa pode renová-las ou utilizar um novo modelo que seja mais eficiente. Algumas partes das hélices podem ser recicladas, enquanto outras podem ser reaproveitadas.

Ao fim da avaliação, os engenheiros notaram que 50% dos componentes ainda têm valor e podem ser usados em novos aerogeradores, isso significa que, em vez de comprar novos componentes, estarão reaproveitando os existentes.

Se cada aerogerador custa 3 milhões de euros, e 50% desse valor pode ser recuperado por meio do reaproveitamento de peças antigas, a empresa economiza 1,5 milhões de euros por aerogerador. Para 10 aerogeradores, isso resulta em uma economia total de 1,5 milhões de euros.

Tabela 9 - Dados referentes aos gastos por substituição e reaproveitamento.

	Resultado (€)	Cálculo
<b>Substituição</b>		
Novos aerogeradores	30.000.000	10 unidades $\times$ 3.000.000€
Gastos operacionais ao longo de 25 anos	2.500.000	25 anos $\times$ 100.000€
Custo total da substituição	32.500.000	30.000.000€ + 2.500.000€
<b>Reaproveitamento com LCR</b>		
Economia por aerogerador (50%)	1.500.000	3.000.000 $\times$ 0,5
Custo por aerogerador reaproveitado	1.500.000	3.000.000€ - 1.500.000€
Custo total para 10 aerogeradores	15.000.000	10 $\times$ 1.500.000
Gastos operacionais ao longo de 25 anos	2.500.000	25 $\times$ 100.000
Custo total do reaproveitamento	17.500.000	15.000.000 + 2.500.000

Após a implementação do sistema de reaproveitamento, a empresa notou que, mesmo ao final da vida útil dos aerogeradores, os ativos ainda podiam ser utilizados enquanto estivessem em boas condições, estimando que por mais 10 anos de trabalho. Essa abordagem não apenas maximizou o retorno sobre os investimentos, mas também contribuiu para a sustentabilidade da operação.

O valor de um ativo físico ao longo do tempo pode ser observado sob duas perspectivas, sendo uma focada na desvalorização do ativo existente e a outra na

previsão do custo de reposição de um novo ativo. Essas duas perspectivas são essenciais quando trata-se de criar reservas financeiras para renovação ou compra de um novo ativo ao final de sua vida útil econômica.

Seguindo o trabalho de Farinha *et al.* (2023), a perspectiva da desvalorização, considera o uso da taxa aparente para representar ao longo do tempo, a depreciação do ativo em termos monetários. Esta depreciação é expressa pela Equação (15).

$$C_{0D}^t = C_{0D}^{t-1} \times i_A \quad (15)$$

Onde:

$C_{0D}^t$ : Valor do Ativo Físico no tempo  $t$ ;

$C_{0D}^{t-1}$ : Valor do Ativo Físico no tempo  $t - 1$ ;

$i_A$ : Taxa Aparente.

A utilização da equação 15, não envolve a aplicação de expoentes de potência, conforme é utilizado com as taxas para cálculo de valor presente. O tempo  $t$ , não é aplicado no cálculo como expoente, apenas indicador do ano.

O uso dessa equação é aplicado ao ativo físico atual/existente e que vai perdendo valor com o tempo devido à depreciação, desgaste ou obsolescência. Essa desvalorização reflete o quanto de vida útil o ativo já consumiu.

Compreender essa perda de valor ajuda a tomar decisões sobre manutenção, reforma ou substituição do ativo. A ideia em aplicar essa equação não é desvalorizar, mas refletir o uso e o desgaste natural para uma gestão consciente.

Assim como pode-se verificar a desvalorização de um ativo existente, é possível também com uma pequena alteração, equação (16), calcular o valor de um ativo novo, considerando a valorização em relação à taxa aparente.

O cálculo é feito dividindo o valor do novo ativo no tempo anterior  $C_{0D}^{t-1}$  pela Taxa Aparente  $i_A$ .

$$C_{0D}^t = \frac{C_{0D}^{t-1}}{i_A} \quad (16)$$

O objetivo é comparar o custo de manter o ativo existente (levando em conta a depreciação, custos de manutenção e eficiência) com o custo de adquirir um novo, que terá maior eficiência, menor manutenção e mais vida útil.

No contexto do ciclo de vida, a comparação entre o valor atual do ativo existente e o custo de reposição de um novo ajuda a entender quando é mais vantajoso continuar utilizando o ativo ou substituí-lo.

Nesse contexto, a equação do Valor Presente Líquido (VPL) é apresentada no trabalho de J. T. Farinha *et al.* (2023), em duas versões, de depreciação do ativo existente, Eq. (17), e de projeção do valor de um novo ativo, Eq. (18).

Por meio dessas equações é possível estimar a viabilidade econômica de continuar operando com o ativo atual ou investir em um novo ativo.

Considerando a depreciação do ativo físico a equação é apresentada como:

$$NPV_{TD} = NPV_{FpN} + NPV_{Fe} \quad (17)$$

Onde:

$NPV_{TD}$ : Representa o Valor Presente Líquido Total considerando a desvalorização do ativo físico

$NPV_{FpN}$ : Trata-se do Valor Presente Líquido do movimento financeiro associado à produção que o ativo gera, tomando em conta a depreciação.

$NPV_{Fe}$ : Representa o Valor Presente Líquido das despesas financeiras associadas ao uso e à manutenção do ativo.

Essa fórmula ajuda a calcular o retorno financeiro gerado pelo ativo atual, considerando tanto os ganhos operacionais quanto os custos associados ao desgaste do ativo.

Já considerando o valor de um novo ativo físico, a equação do VPL é dada por:

$$NPV_{TN} = NPV_{FpN} + NPV_{Fe} \quad (18)$$

Onde:

$NPV_{TN}$ : Representa o Valor Presente Líquido Total considerando a aquisição de um novo ativo físico.

$NPV_{FpN}$ : Trata-se do VPL do movimento financeiro da produção que o novo ativo trará.

$NPV_{Fe}$ : Representa o VPL das despesas financeiras associadas ao novo ativo.

## 2.7 Políticas de Manutenção e Gestão de Desempenho

O conceito de ciclo de vida é essencial para a avaliação dos sistemas de energia renovável, pois permite uma análise detalhada de todas as fases, desde a aquisição até o descarte. Entretanto, para garantir que os sistemas mantenham sua eficiência e viabilidade ao longo do tempo, é crucial aplicar práticas eficazes de manutenção que não apenas contribuam para a longevidade dos ativos, mas também interfiram diretamente nos custos operacionais e no desempenho dos sistemas.

Assim como nas análises de ciclo de vida, o foco da manutenção está em prolongar a vida útil dos ativos e maximizar o valor que eles proporcionam ao longo do tempo. As políticas de manutenção também são aplicadas para minimizar os custos operacionais e promover um ambiente de trabalho seguro, garantindo que os ativos sejam mantidos operacionais e eficientes.

Através dessas políticas, é possível definir como e quando os processos de manutenção serão realizados, seja de forma planejada ou reativa, sempre com o objetivo de equilibrar os custos e a fiabilidade. Uma política bem estruturada ajuda a evitar paragens não programadas, permite que os ativos alcancem o seu máximo potencial de desempenho e promovam sustentabilidade, ao reduzir a necessidade de substituições frequentes.

## 2.7.1 Contexto Histórico

A história da manutenção reflete a evolução das necessidades humanas em cuidar e preservar ativos essenciais, desde as civilizações antigas até as complexas operações industriais modernas, Figura 28.

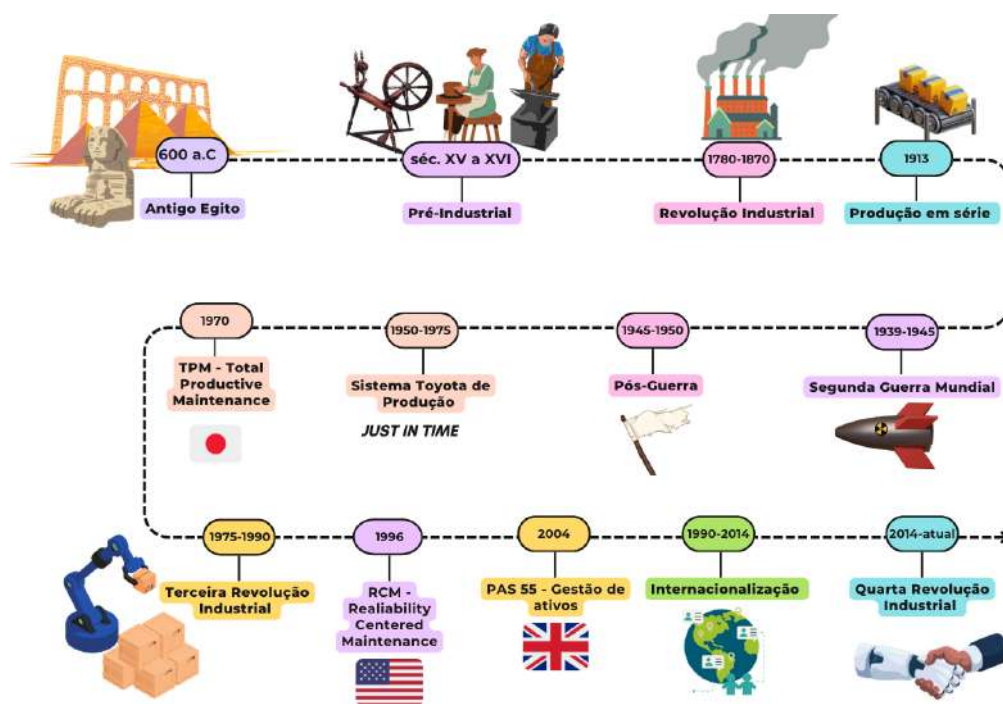


Figura 28 - A manutenção ao longo da história.

Tudo começa quando os egípcios e os romanos precisavam cuidar de suas obras de engenharia, como pirâmides, barcos e aquedutos. Esses povos já reconheciam a importância de manter seus ativos em bom estado para garantir sua funcionalidade e durabilidade. Segundo Poór *et al.* (2019), foram encontrados no antigo Egito um documento egípcio de 600 a.C., onde é mencionado a interrupção de madeira para manutenção de um barco.

Na era pré-industrial, antes da Revolução Industrial, a manutenção era uma prática rudimentar. Os artesãos e trabalhadores eram responsáveis por cuidar de ferramentas e estruturas, baseando-se na experiência e no conhecimento empírico. Não havia sistemas formalizados, e as reparações eram feitas conforme necessário, muitas vezes dependendo da habilidade do trabalhador e da disponibilidade de materiais.

Com a Revolução Industrial, o uso de máquinas tornou-se mais comum, e a necessidade de manutenção eficaz tornou-se evidente. As máquinas industriais, como as locomotivas utilizadas na época, exigiam cuidados regulares para funcionar. E a forma de manutenção mais característica nesse período foi a manutenção corretiva, na qual a reparação é feita somente após a avaria e o objetivo dela é colocar a máquina avariada de volta às condições operacionais normais (Poór *et al.*, 2019).

A estratégia de deixar o dispositivo funcionar até que ele falhe, foi a primeira aplicada. À primeira vista, é a maneira mais fácil e natural de manutenção, até por que naquele período, as máquinas eram bastante simples e mais robustas.

Um exemplo comum seria a máquina de costura, na Figura 29 é possível visualizar a comparação de um modelo antigo (a) vs. o atual da mesma marca (b). Antes, essas máquinas eram construídas em metal e peças simples, tornando-as muito duráveis, mas também custosas devido à quantidade de material utilizada. Hoje, embora as máquinas modernas sejam mais leves e tecnológicas, as políticas de manutenção atuais proporcionam um ciclo de vida duradouro.



Figura 29 - Exemplo da alteração nas características físicas de uma mesma máquina ao longo do tempo: a) Máquina de costura em seus primórdios, robustas, construídas em metal; b) Máquina atual mais tecnológica e menos robusta.

Fonte: (Singer, 2019)

A manutenção corretiva, segundo Poór *et al.* (2019), apresenta vantagens como o custo inicial baixo e a simplicidade de implementação, permitindo que as empresas reajam a problemas conforme eles surjam, sem necessidade de um planejamento. No entanto, suas desvantagens incluem custos elevados a longo prazo, devido a reparos emergenciais e interrupções na produção, além do impacto negativo na produtividade e da potencial deterioração dos equipamentos, o que pode resultar em uma vida útil reduzida dos ativos.

Dando seguimento a história da manutenção após a primeira revolução industrial, com base ainda no trabalho de Poór *et al.* (2019), é notado que a evolução da manutenção está ligada às transformações proporcionadas pelas revoluções

industriais. Cada fase do desenvolvimento industrial trouxe inovações tecnológicas que impactaram diretamente as práticas de manutenção.

Cerca de 100 anos depois da primeira revolução, em 1870 dá-se início a segunda revolução industrial, marcada pela eletrificação e pela introdução de novas invenções tecnológicas como a lâmpada de Thomas Edison e o transformador de Nikola Tesla. Essas invenções mudaram o cotidiano das pessoas, permitindo, por meio da eletricidade, a iluminação de cidades e a comunicação à distância. Com a alteração da estrutura de produção industrial, surgiram as linhas de montagem e a produção em massa, o que tornou as máquinas mais complexas e suscetíveis a falhas.

Nesse cenário, a manutenção preventiva emerge para prolongar a vida útil dos equipamentos evitando as falhas antes que ocorressem, trazendo benefícios como menor tempo de inatividade e maior eficiência. Contudo, gerou custos adicionais devido à necessidade de peças sobressalentes e manutenção programada. Apesar de seus custos iniciais, a manutenção preventiva demonstra ser mais econômica a longo prazo, proporcionando maior fiabilidade e eficiência.

Além das transformações tecnológicas, o contexto geopolítico da época também foi profundamente influenciado por essas inovações. A expansão das potências industriais e a exploração de colônias levaram à Primeira Guerra Mundial. Assim, a eletrificação e as inovações da Segunda Revolução Industrial não apenas moldaram o panorama industrial, mas também tiveram implicações sociais e políticas de proteção, refletindo a interconexão entre tecnologia, economia e a dinâmica das relações internacionais (Poór *et al.*, 2019).

A Terceira Revolução Industrial, também conhecida como Revolução Digital, começou na década de 1970 e foi marcada por inovações tecnológicas que transformaram a produção e a gestão industrial, com a chegada da automação quando o primeiro controlador lógico programável PLC (Programable Logic Controller), foi feito. Um pequeno computador industrial para automação de processos (Poór *et al.*, 2019).

O uso de PLCs, microprocessadores e computadores permitiu o controle automatizado de processos e máquinas, reduzindo a necessidade de intervenção humana e aumentando a eficiência operacional. Esses avanços levaram ao desenvolvimento de sistemas de produção mais complexos e interconectados, onde a monitorização em tempo real e a análise de dados tornaram-se fundamentais para a operação das indústrias.

A combinação de automação, computadores e internet também impulsionou o desenvolvimento de sistemas de monitoramento em tempo real, permitindo o surgimento da manutenção preditiva. Essa abordagem utiliza sensores para coletar informações sobre as condições dos equipamentos, como temperatura e vibração. Assim, em vez de realizar manutenções programadas com base em intervalos de tempo fixos, os gestores podem prever falhas com base no estado real do equipamento, o que resulta em uma utilização mais eficiente dos recursos e redução

de custos. No entanto, a manutenção preditiva requer investimentos em sistemas de monitoramento e treinamento especializado (SenseMore, 2024).

Para Poór *et al.* (2019) da mesma forma que houve entre a primeira e segunda revolução a transição do carvão e do vapor para a eletricidade. A transição da mecânica para a automação foi mais um resultado da evolução natural do que uma revolução real.

No contexto da Terceira Revolução Industrial, junto com as inovações trazidas pela automação e pela eletrônica, surgiram novas metodologias de gestão que refletiram as transformações tecnológicas e organizacionais da época. *Total Productivity Maintenance* (TPM) e *Reliability Centred Maintenance* (RCM).

As duas filosofias de gestão, TPM e RCM, surgiram em um contexto histórico marcado por profundas transformações na indústria e na economia em um cenário pós segunda guerra mundial.

A Manutenção Produtiva Total é uma metodologia que nasceu no Japão durante a década de 1970, num contexto de reconstrução econômica após a Segunda Guerra Mundial. Naquele período, as indústrias japonesas enfrentavam desafios significativos, como a necessidade de modernizar a produção e competir a nível global. A TPM surgiu para enfrentar esses desafios, com o objetivo de maximizar a eficiência e a fiabilidade dos equipamentos de produção, reduzindo o tempo de paragem e as avarias inesperadas.

O princípio fundamental da TPM é que a responsabilidade pela manutenção não deve ser exclusiva das equipas técnicas, mas sim de todos os trabalhadores. Isso significa que operadores, técnicos e gerentes são responsáveis por garantir que os equipamentos estejam em condições ideais, ajudando a detectar problemas e realizar intervenções antes que falhas graves ocorram.

No contexto da Terceira Revolução Industrial, à medida que os sistemas de produção se tornavam mais complexos, a TPM ajudou a promover a eficiência e a fiabilidade dos processos produtivos, minimizando as paragens imprevistas e otimizando o uso de recursos. Esta abordagem permitiu às empresas melhorarem o desempenho global dos seus sistemas e alcançar uma maior competitividade, num ambiente industrial cada vez mais automatizado (Virgílio, 2018).

A RCM surgiu nos Estados Unidos na década de 1996, em um período de aumento da complexidade industrial e automação. Inicialmente desenvolvida para a aviação comercial e militar, a RCM visava garantir a segurança e fiabilidade de sistemas críticos. Na indústria aeronáutica, o mau funcionamento de um equipamento poderia ter consequências fatais, o que impulsionou a criação de uma metodologia sistemática para priorizar e executar manutenções com base na importância de cada componente e no risco que sua falha apresentava.

O principal objetivo da RCM é identificar modos de falha, ou seja, as maneiras pelas quais um sistema ou equipamento podem falhar, e implementar práticas de manutenção que reduzam a probabilidade dessas falhas ocorrerem. Ela não segue

uma abordagem genérica, mas sim personalizada para cada sistema, levando em conta a função específica dos equipamentos, os efeitos potenciais de suas falhas e a criticidade de cada componente.

O que tornou a RCM especialmente relevante durante a Terceira Revolução Industrial foi a crescente interconexão e automação dos sistemas. À medida em que a tecnologia avançava, com o uso de sensores, computadores e monitoramento em tempo real, as indústrias passaram a precisar de uma abordagem mais estratégica. A RCM permitiu que as empresas ajustassem suas práticas de manutenção com base nas condições reais dos equipamentos, ao invés de manutenções puramente programadas ou reativas. Isso aumentou a eficiência operacional, pois se evitava a substituição de peças desnecessárias e reduzia-se o tempo de inatividade, concentrando esforços apenas quando as condições do equipamento indicavam risco iminente.

Apesar de compartilhar semelhanças como a utilização de dados para identificar falhas potenciais, a RCM e a Manutenção Preditiva são distintas, pois enquanto a RCM trata-se de uma filosofia que determina as melhores práticas de manutenção com base na criticidade de cada equipamento e nas consequências de sua falha; a manutenção preditiva, por outro lado, é uma técnica específica de manutenção que se concentra no uso de dados em tempo real (como sensores de vibração, temperatura, etc.) para prever falhas antes que elas ocorram (Martínez, 2010).

Ao longo do tempo, a transição para o século XXI foi marcada pela chegada da Revolução Digital e da Indústria 4.0, que trouxe novas ferramentas e tecnologias para o campo da manutenção. Entre essas inovações, destacam-se a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial, que transformaram os processos de gestão de ativos. Sensores conectados possibilitam o monitoramento em tempo real dos ativos, enquanto algoritmos de aprendizado de máquina aprimoram a previsão de falhas com maior precisão. Essa evolução resultou em uma abordagem de manutenção mais proativa e adaptativa, permitindo ajustes dinâmicos baseados nas condições reais de operação (Jesus, 2021).

A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, traz uma evolução significativa. Ela é caracterizada pela conectividade entre dispositivos através da Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial. Com essas tecnologias, as máquinas podem comunicar e compartilhar informações em tempo real, permitindo uma produção mais personalizada e eficiente. As empresas podem ajustar suas operações dinamicamente com base em dados, otimizando processos e reduzindo custos.

A aplicação da Indústria 4.0 na indústria automotiva é um exemplo de como a tecnologia transforma a produção. Em linhas modernas, sensores conectados (Internet das Coisas - IoT) são instalados em máquinas e equipamentos para coletar dados em tempo real. Esses sensores monitoram variáveis como temperatura, vibração e eficiência operacional. Os dados coletados pelos sensores são enviados para um sistema central, onde são armazenados e analisados. À medida que o volume de dados aumenta, é utilizado big data para processar essas informações, analisando

o histórico de manutenção das máquinas, os tempos de inatividade e os dados de produção. E por meio de inteligência artificial (IA), algoritmos de aprendizado de máquina são treinados com dados históricos para identificar comportamentos anômalos que podem indicar a probabilidade de falhas em um equipamento. Essa análise preditiva permite que as empresas realizem manutenções apenas quando necessário, aumentando a eficiência operacional e reduzindo custos.

Segundo Poór *et al.* (2019), a manutenção preditiva no contexto da indústria 4.0, é agora a forma mais alta de manutenção da atualidade, cujo método de prevenção de falhas é por meio de análise dos dados para identificar padrões anômalos. A chave para isso é uma combinação de análise de *Big data* e inteligência artificial para criar insights e detectar padrões.

As tendências futuras em estratégias de manutenção estão se alinhando com as inovações que traz a próxima revolução industrial, chamada de Indústria 5.0. Essa nova fase foca em integrar as capacidades das máquinas com as habilidades humanas, enfatizando que as tecnologias não são projetadas para substituir os trabalhadores, mas sim para colaborar com eles. Essa colaboração resulta em um ambiente de trabalho mais produtivo e saudável, onde a experiência do trabalhador é central, com um foco forte no seu bem-estar e desenvolvimento de habilidades.

Nesse contexto, diversas tendências estão surgindo. A manutenção autônoma, por exemplo, utiliza robôs e sistemas alimentados por inteligência artificial para executar tarefas rotineiras, aliviando os trabalhadores de funções repetitivas. A realidade aumentada também desempenha um papel importante, permitindo que os técnicos utilizem óculos de Realidade Aumentada (RA) para receber orientações em tempo real durante reparos, aumentando a eficiência e a precisão das intervenções.

Além disso, a tecnologia das duas coisas digitais está se tornando cada vez mais relevante. Essas réplicas virtuais de sistemas e processos permitem simulações avançadas, possibilitando a manutenção preditiva e uma melhor compreensão das condições operacionais antes que problemas reais surjam.

Para SenseMore (2024), outro aspecto fundamental é o foco na sustentabilidade. As práticas de manutenção estão se voltando para a otimização de recursos e a implementação de métodos ecologicamente corretos, alinhando-se com as demandas globais por responsabilidade ambiental.

Ainda segundo SenseMore (2024), apesar dos avanços tecnológicos e das novas abordagens nas estratégias de manutenção, muitas empresas ainda não dão à manutenção a importância que ela merece. Para mudar essa perspectiva, é fundamental adaptar a cultura corporativa, promovendo uma visão em que a manutenção seja considerada uma parceria estratégica.

Por meio da tabela 10, é visto a evolução das políticas de manutenção ao longo da história, associada com as revoluções industriais.

Tabela 10 - Evolução dos processos de manutenção associados as revoluções industriais.

	1ª Revolução Industrial	2ª Revolução Industrial	3ª Revolução Industrial	Indústria 4.0	Indústria 5.0
Características	Mecanização com o uso da máquina a vapor	Eletrificação, produção em massa, novas invenções	Automação com o uso de computadores	IoT, Big data, inteligência artificial, conectividade	Integração entre humanos e máquinas
Tipo de Manutenção	Manutenção corretiva: Reparo após falha	Manutenção preventiva: Intervenções planejadas	Manutenção preditiva: Intervenção após análise de dados	Manutenção preditiva avançada: Análise de dados em tempo real, uso de Big data e IA	Manutenção autônoma: Robôs e IA executando tarefas, realidade aumentada para suporte
Responsáveis	Artesãos treinados	Inspetores e técnicos	Engenheiros especializados em automação	Analistas de dados e engenheiros de sistemas	Especialistas em IA, robótica e manutenção assistida por IA

## 2.7.2 Normas aplicadas a manutenção

À medida em que as Revoluções Industriais avançaram, tornou-se essencial padronizar práticas para garantir a mesma qualidade em processos e produtos. Nesse contexto, surgiram as Normas Internacionais e as Normas Europeias, que estabeleceram padrões claros para assegurar a conformidade, segurança e eficiência em diversas indústrias. Essas normas são fundamentais para harmonizar processos, como por exemplo o de manutenção, promovendo qualidade e competitividade no mercado global.

O contexto histórico do surgimento da *International Organization for Standardization* (ISO) em 1946, foi a necessidade de simplificar o comércio internacional para recuperação da economia, em um cenário de pós-guerra. Com a padronização de processos, as indústrias não tinham a necessidade de ajustar seus produtos a múltiplos padrões locais.

A ISO é uma organização independente e não governamental, tendo em outubro de 2024 a representação de 172 países. As normas são elaboradas por comitês técnicos compostos por especialistas das indústrias, governos e academia. Cada país é representado por uma organização nacional de normalização, no caso de Portugal, é o Instituto Português da Qualidade (IPQ). No Brasil, é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essas organizações além de contribuir para criação ou revisão de uma norma internacional *standard*, pela ISO, também são responsáveis por publicar as normas com as adaptações necessárias para o contexto de cada país (ISO, 2024).

Um exemplo da importância da normalização, é a ISO 216, que estabelece um padrão internacional para tamanhos de papel. O formato A4, o mais amplamente utilizado no mundo, ilustra como a adoção de um padrão comum evita barreiras comerciais. Caso cada país utilizasse medidas diferentes, haveria dificuldades na

comercialização internacional tanto do papel como de impressoras, já que as indústrias teriam que sempre alterar a produção para padrões específicos de cada região. Isso aumentaria os custos de produção e dificultaria a eficiência global (Lenovo, 2024).

As ISO são normas internacionais, mas a sua adoção é opcional para os países. Por serem voluntárias, o interesse das empresas em serem certificadas em uma ISO, é aumentar a confiança de clientes, colaboradores e a sociedade em geral, além de melhorar a reputação da organização no mercado (*Eurofins Environment Testing Spain, 2024*).

Para que uma empresa seja certificada com uma norma ISO, ela precisa passar por um processo de auditorias realizado por entidades acreditadas, geralmente empresas privadas. Em Portugal, estas entidades são acreditadas pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC), que promovem o processo de certificação, de forma a seguir padrões rigorosos de imparcialidade e competência (IPAC, 2022).

As normas ISO servem como um guia, permitindo flexibilidade para que os países adaptem os requisitos para melhor atender às suas realidades, como legislações específicas, práticas culturais e condições de mercado.

A Figura 30, descreve a cronologia desde o surgimento da norma até a certificação da empresa com esta norma.



Figura 30 - Processo de certificação ISO em Portugal.

Um exemplo é a aplicação da ISO 14001 - Sistemas de Gestão Ambiental (SGA), cuja certificação demonstra o compromisso das empresas com práticas ambientais sustentáveis. No contexto adaptativo da aplicação da norma, em países com regulamentações ambientais mais rígidas, como a China, a aplicação da ISO 14001 é adotada com rigor, incluindo auditorias frequentes e monitoramento detalhado, para garantir conformidade e atender às expectativas de parceiros comerciais internacionais. Em contrapartida, em países em desenvolvimento onde as regulamentações são menos exigentes, a implementação da ISO 14001 é adaptada, focando em áreas-chave como gestão de resíduos e redução de poluição (Liu *et al.*, 2020).

Mesmo com as normas ISO estabelecidas desde 1947 para promover a padronização global e facilitar o comércio internacional, algumas décadas depois surgiram as normas europeias. Esse movimento começou a tomar forma nos anos 1960 e 1970, quando o continente buscava maior integração econômica após a criação da Comunidade Econômica Europeia (CEE). A necessidade de harmonizar as regulamentações internas e criar um mercado único, impulsionou a criação de normas específicas para o contexto europeu, conhecidas como European Norms (EN). Elas foram desenvolvidas principalmente através de entidades regionais de normalização, como o Comitê Europeu de Normalização (CEN), fundado em 1961. A partir da década de 1980 as normas europeias ganharam força legal e foram formalmente adotadas para facilitar o comércio dentro do mercado único da União Europeia. Portanto, as normas ISO e EN coexistem, sendo que as EN atendem a requisitos específicos da União Europeia (UE) enquanto a ISO abrange um cenário global (Ballor, 2022).

No caso da Europa, as normas ISO podem ser transformadas em normas europeias e o uso do "EN" é uma maneira de indicar que a norma não só atende a padrões internacionais, mas também foi adaptada e aceita em um contexto europeu, promovendo a integração e a uniformidade entre os países membros da UE. Por exemplo o prefixo EN em EN ISO 9001 indica que a norma ISO 9001 foi adotada e publicada como uma norma europeia, ou seja, uma norma reconhecida e aplicável em todos os países da União Europeia.

Um exemplo do cotidiano e que pode ser observado é a presença da ISO 9001 (Gestão da Qualidade) na embalagem de produtos alimentares de grandes supermercados como o Continente e o Pingo Doce, ao evidenciar a aplicação dessa norma é uma forma de mostrarem que adotam práticas rigorosas de controle de qualidade, garantindo não apenas a segurança e a integridade dos alimentos, mas também a transparência e a responsabilidade social em relação à população, Figura 31.



Figura 31 - Certificação ISO 9001 exposta em produtos Continente®.

Para que um produto possa ser comercializado no Espaço Econômico Europeu (EEE), muitas das vezes é necessário que ele tenha a marcação Conformidade Europeia (CE), Figura 32, essa marca sinaliza que um determinado produto está em

conformidade com as normas europeias, assegurando que é seguro para os consumidores e cumpre os requisitos de segurança, saúde e proteção ambiental definidos pela legislação da UE. Isso é fundamental para a proteção do consumidor e para a facilitação do comércio dentro do mercado único europeu (Valente, 2024).



Figura 32 - Marcação CE de conformidade com as normas europeias.

Fonte: (Valente, 2024)

Quando uma norma europeia (EN) é reconhecida e adotada pelo Instituto Português de Qualidade (IPQ), ela pode ser publicada como uma norma nacional, podendo receber a designação de NP EN. Isso indica que a norma europeia está agora oficialmente reconhecida e aplicada no contexto português, podendo incluir adaptações específicas para atender às necessidades locais ou regulamentações do país. Por exemplo a Norma Portuguesa NP EN 13306 Manutenção Terminologia de manutenção.

O sufixo depois da norma, indica o ano da edição em que foi publicado. Nesse caso, a NP EN 13306:2021 é a edição mais recente, publicada em 2021, referente a Norma Europeia EN 13306:2017.

A norma define "manutenção" como um conjunto de ações técnicas, administrativas e de gestão realizadas ao longo do ciclo de vida de um ativo, com o objetivo de mantê-lo ou restaurá-lo a um estado em que ele possa desempenhar a função desejada. Segundo a norma, a manutenção é dividida em três categorias principais: Melhoria, Manutenção Preventiva e Manutenção Corretiva, as categorias principais derivam uma série de outras categorias, Figura 33.

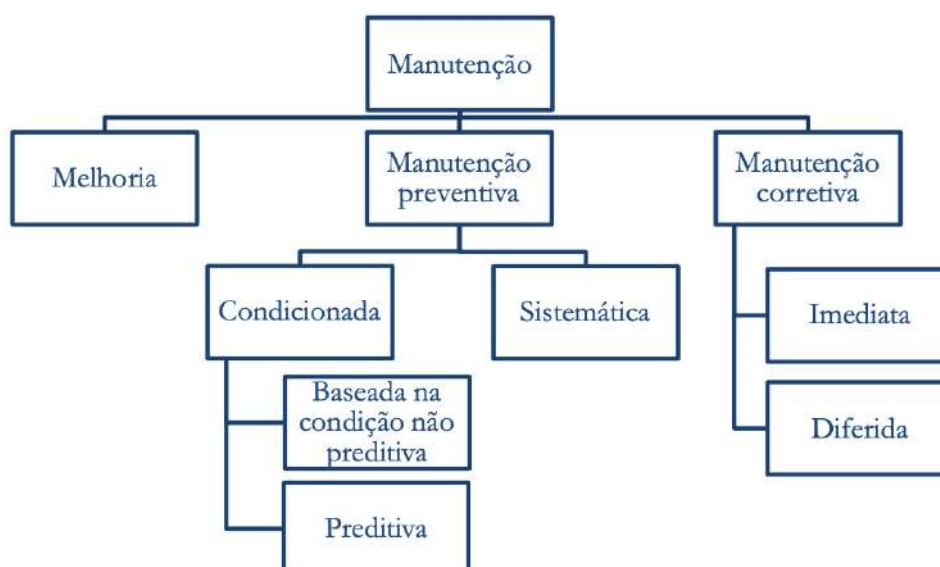


Figura 33 - Hierarquia da manutenção segundo a norma NP 13306.

Fonte: (Garrido, 2023)

- **Melhoria:** É uma categoria onde há alterações nas características do equipamento para aprimorar seu desempenho, segurança ou capacidade. A melhoria visa superar as limitações anteriores, ampliando o potencial do sistema.
- **Manutenção Corretiva:** É o tipo que corre após uma falha, com o objetivo de restaurar a funcionalidade do sistema. A partir dessa categoria mais dois grupos surgem:
  - **Manutenção Corretiva Imediata:** Realizada imediatamente após uma falha. O que minimiza a inatividade do ativo.
  - **Manutenção Corretiva Diferida:** Feita após uma falha, mas é agendada para um momento futuro.
- **Manutenção Preventiva:** Realizada antes da ocorrência de uma falha, com o objetivo de preveni-la. A partir da Manutenção Preventiva, deriva-se mais duas manutenções:
  - **Manutenção Sistemática:** Realizada em intervalos de tempo regulares ou conforme cronograma, independentemente dos sinais.
  - **Manutenção Condicionada:** Realizada quando há evidências de que uma falha pode estar aproximando-se. É baseada em observações e probabilidade de desgaste e dá origem a outras duas categorias:
    - **Manutenção Preditiva:** Utiliza monitoramento e análise de dados para prever o momento ideal para a manutenção antes que ocorra uma falha.
    - **Manutenção Baseada na Condição Não Preditiva:** Realizada com base nas condições específicas do equipamento, mas sem previsão exata de quando ocorrerá uma falha.

Outra análise sobre os tipos de manutenção é possível a partir das classificações Programada vs. Não Programada, Figura 34.

Manutenção Programada: Refere-se a intervenções planejadas com antecedência, que podem ser realizadas em intervalos regulares ou de acordo com critérios específicos, e independentemente do estado do equipamento. A manutenção programada engloba as já mencionadas, Manutenção Sistemática, Manutenção Condicionada e Manutenção Corretiva Diferida.

Manutenção Não Programada: Ocorre sem planejamento prévio, em resposta a uma necessidade emergente, como uma falha inesperada. Essa categoria engloba a Manutenção Corretiva Imediata ou Manutenção Oportunística (Preventiva ou Corretiva Diferida).

A Manutenção Oportunística é a realização de manutenções preventivas ou corretivas diferidas, mas, uma vez que estas são manutenções planejadas, enquadram-se no âmbito da Manutenção Não Programada por aproveitar uma situação conveniente para já tratar de algo previsto no futuro, as enquadrando assim em Oportunística. Por exemplo, em uma reparação corretiva é aproveitado a máquina aberta para substituir elementos já previstos, não sendo necessário voltar a abri-la futuramente.

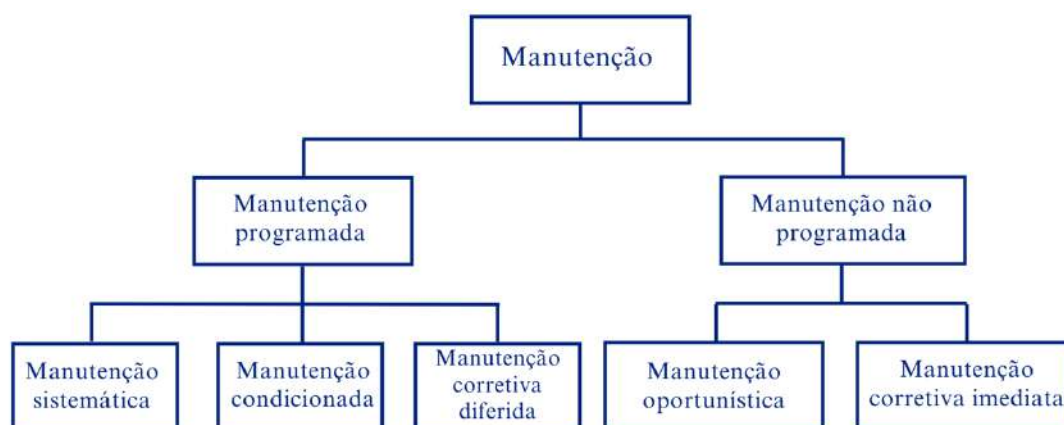


Figura 34 - Distinção de metodologias programadas e não programadas

Fonte: (Adaptado de Figueiredo, 2021)

Através do conhecimento adquirido em instalações de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC), enquanto gestor da manutenção, foi desenvolvido um exemplo prático, baseado em situações reais onde são abordados os tipos de manutenção descritos.

Em um condomínio equipado com um sistema solar térmico, os painéis instalados no telhado são responsáveis por aquecer a água, que é posteriormente armazenada em um reservatório. Este sistema é composto por válvulas, bombas de circulação e sensores de temperatura, que asseguram o seu funcionamento adequado. A manutenção desempenha um papel crucial para garantir a eficiência contínua do sistema, especialmente durante o inverno, quando a demanda por água quente aumenta significativamente.

Durante o inverno, a equipa de manutenção observa que o sistema perde calor e resulta em uma maior dependência do aquecimento elétrico auxiliar. A equipa realiza uma manutenção de melhoria e instalam uma camada adicional de isolamento nas tubagens expostas. Essa intervenção aumentou a retenção de calor e a eficiência do sistema, sem a necessidade de substituir equipamentos.

Para evitar falhas e garantir a durabilidade, são aplicadas diferentes manutenções preventivas:

**Manutenção Sistemática:** Anualmente, é realizada a limpeza dos painéis solares e uma inspeção das válvulas e do isolamento das tubagens para garantir que não haja vazamentos ou perdas de calor. Essa manutenção é feita em intervalos regulares, independentemente do estado do equipamento.

**Manutenção Condicionada:** A cada seis meses, a equipa verifica o estado dos sensores de temperatura (termômetros) e pressão (manômetros). Se algum sensor apresentar sinais de desgaste ou fornecer leituras imprecisas, a equipe realiza a manutenção necessária, atualizando ou ajustando o sensor antes que isso possa impactar o desempenho do sistema.

**Manutenção Preditiva:** Durante a manutenção, a equipa monitora o caudal da bomba e a temperatura da água dentro do reservatório. Se a temperatura cair sem explicação, isso pode indicar problemas no sistema de circulação. Com base em dados de desempenho e padrões observados, a equipa consegue prever quando é o melhor momento para realizar a substituição da bomba, evitando falhas no sistema e garantindo um funcionamento eficiente.

**Manutenção Baseada na Condição Não Preditiva:** Por meio de inspeções visuais para verificar sinais de corrosão ou pequenos vazamentos nas conexões e tubagens, quando identificadas alguma anomalia, a equipa realiza a troca desses componentes conforme necessário. Esse tipo de manutenção depende das condições observadas, mas sem previsão exata de falha.

Mesmo com a previsibilidade dos dados, existem situações atípicas que fogem do controlo da equipa de manutenção, e durante uma tempestade houve uma descarga elétrica que queimou a bomba circuladora.

**Manutenção Corretiva Imediata:** Como uma falha da bomba impacta diretamente o aquecimento da água, a equipa realiza uma manutenção corretiva imediata, substituindo a bomba para restaurar a funcionalidade do sistema.

**Manutenção Corretiva Diferida:** Durante a inspeção anual, foi observado que alguns manômetros estavam partidos, entretanto não interferiam no funcionamento do sistema. Essa observação foi descrita na folha de serviço e a substituição foi programada para manutenção seguinte.

**Manutenção Oportunística:** Durante a substituição da bomba, a equipa aproveitou a intervenção no circuito hidráulico para substituir as válvulas que já apresentavam sinais de desgaste e oxidação, antecipando uma intervenção futura e consequentemente mais um corte de água.

Para o exemplo descrito, na Tabela 11, foram desenvolvidas rotinas de manutenção semestral de modo semelhante ao que é feito na realidade com o acompanhamento técnico.

Tabela 11 - Exemplo de rotinas de manutenção preventiva semestrais aplicadas ao solar térmico.

Periodicidade	Atividades a Realizar	Semestral	Anual
Semestral	- Limpeza dos painéis solares	X	X
	- Inspeção das válvulas	X	X
	- Verificação do isolamento das tubagens para vazamentos ou perdas de calor	X	X
	- Verificação do estado dos sensores de temperatura (termômetros) e pressão (manômetros)	X	X
	- Inspeções visuais de conexões e tubagens	X	X
	- Verificação de sinais de corrosão ou vazamentos	X	X
Anual	- Monitoramento do caudal da bomba		X
	- Verificação da temperatura da água no reservatório		X
	- Análise de dados de desempenho para prever necessidades de manutenção		X
	Data:	05/05/24	06/11/24
	Técnico:	ABCD	XPTO

A NP 13306:2021 é uma norma que define e categoriza as diferentes atividades de manutenção, entretanto, existem outras normas ligadas ao setor e que abrangem outras questões, atuando de forma complementar a NP 13306, como é o caso da norma NP 4492:2023, desenvolvida para especificar requisitos direcionados a prestadores de serviços de manutenção. Com uma aplicação ampla ela abrange organizações de diversos setores e tamanhos, permitindo que esses prestadores demonstrem sua capacidade de fornecer um serviço que atenda tanto às necessidades dos clientes quanto às exigências legais.

A norma NP 4492:2023 e a NP 13306:2021 estão ambas ligadas ao setor de manutenção, mas abordam aspectos complementares. A NP 13306 define os termos e conceitos da manutenção enquanto a NP 4492 foca na padronização e qualificação para os prestadores de serviços de manutenção, dessa forma é possível ter uma métrica para distinguir os prestadores de serviço, enfatizando a confiança e competência.

De acordo com a Associação Portuguesa de Manutenção Industrial, APMI (2024), qualquer prestador de serviços de manutenção deve cumprir os requisitos mínimos para poder ser admitido num concurso. Para as grandes organizações, a contratação de Prestador de Manutenção pode ser particularmente exigente e, os que não estiverem bem preparados, ficarão de fora do concurso.

Com base no trabalho de Ribeiro (2018), em Portugal, as entidades que operam com ativos de risco têm a obrigação legal de manter as suas instalações e equipamentos em conformidade com a legislação vigente. Exemplos desses ativos são os elevadores, sistemas de refrigeração, equipamentos sob pressão e instalações elétricas. Que seguem nomeadamente a legislação:

- o Decreto-Lei n.º 90/2010: Regula a manutenção e inspeção de equipamentos sob pressão.

- Decreto-Lei n.º 145/2017: Trata da manutenção e reporte da quantidade de gases fluorados.
- Decreto-Lei n.º 320/2002: Estabelece o regime de manutenção para elevadores e monta-cargas.

Diante disso, ao considerar a implementação de um Sistema de Gestão da Manutenção (SGM), essas entidades devem adotar práticas de manutenção rigorosas para garantir a segurança e eficiência de suas instalações e equipamentos. Uma manutenção adequada não apenas atende aos requisitos legais, mas também contribui significativamente para a longevidade dos ativos e para a segurança dos serviços prestados à população.

Os Técnicos Responsáveis pela Manutenção (TRM) e os Técnicos de Instalação e Manutenção (TIM) têm funções essenciais no contexto da manutenção em diversas infraestruturas. Os TRMs são responsáveis por supervisionar as intervenções, registrar informações da manutenção e assegurar que as operações estejam dentro das normas vigentes.

Para se qualificar como TRM, um profissional pode optar por várias vias, como comprovar experiência profissional em atividades relacionadas à instalação e manutenção ou ter formação específica reconhecida. Segundo estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 102/2021, de 19 de novembro, engenheiros e engenheiros técnicos podem ser reconhecidos como TRM mediante o cumprimento de alguns requisitos.

Por outro lado, os TIMs são responsáveis pela execução prática das atividades de instalação e manutenção, e sua categorização depende das qualificações e experiências que possuem. O reconhecimento desses profissionais pode ocorrer através de formação específica ou, em alguns casos, pela experiência acumulada, (Academia ADENE, 2024).

Para F. Soares (2015), o conceito de nível de manutenção refere-se à categorização das ações de manutenção com base em sua complexidade e nas habilidades necessárias para sua execução. Essa classificação ajuda a determinar os requisitos de formação e experiência da pessoa encarregada.

**Nível 1:** Ações simples que podem ser realizadas por pessoal com formação mínima. Por exemplo, tarefas como limpeza, lubrificação e verificações básicas de funcionamento.

**Nível 2:** Ações básicas executadas seguindo procedimentos detalhados. Por exemplo, Inspeções regulares de equipamentos, troca de peças simples e ajustes básicos.

**Nível 3:** Ações complexas que devem ser realizadas por técnicos específicos, também seguindo procedimentos detalhados. Por exemplo, diagnósticos de falhas em equipamentos e reparos que requerem conhecimentos específicos.

**Nível 4:** Ações realizadas por pessoal especializado pois requerem conhecimento de técnicas ou tecnologias. Por exemplo, intervenções em sistemas eletrônicos complexos.

**Nível 5:** Ações que envolvem conhecimento específico do fabricante ou de empresas especializadas, incluindo o uso de equipamentos de apoio logístico industrial. Por exemplo, a Manutenção e reparo de equipamentos complexos que desativam serviços críticos, nesse caso as intervenções são realizadas por equipas que utilizam equipamentos especializados e ferramentas específicas.

Os serviços de manutenção prestados por um grupo podem ser quantificados por meio de métricas conhecidas como indicadores de desempenho de manutenção *Key Performance Indicators* (KPIs). Esses indicadores são essenciais para ajudar as empresas a monitorar e otimizar suas atividades de manutenção.

Com base no trabalho de J. M. Farinha *et al.* (2013), a norma EN 15341:2007 é uma norma europeia que aborda a gestão de desempenho na manutenção. A partir dela foi desenvolvida a versão portuguesa, a NP EN 15341:2009, Manutenção Indicadores de desempenho da manutenção. Essa norma fornece diretrizes essenciais para a definição e aplicação de KPIs, orientando as organizações na avaliação da eficácia e eficiência de suas práticas de manutenção. A NP EN 15341 trata de aspectos importantes como a seleção dos indicadores adequados, a coleta de dados e a interpretação dos resultados. Essas diretrizes permitem que gestores identifiquem áreas de melhoria nas operações de manutenção.

De acordo com Trancho (2022), baseado na NP EN 15341:2009, são seis os indicadores de desempenho relacionados diretamente com a manutenção:

1. MTBF - *Mean Time Between Failures*
2. MTTR - *Mean Time To Repair*
3. MTTF - *Mean Time To Fail*
4. Disponibilidade Física das Máquinas
5. Custo de Manutenção por Faturação
6. Custo de Manutenção por Valor de Reposição

### **2.7.3 MTBF - *Mean Time Between Failures***

Segundo Keepfy (2022), este indicador mede o tempo médio em que um equipamento opera sem falhar. Ele é calculado dividindo o tempo total de funcionamento em um período, pelo número de falhas ocorridas durante nesse mesmo período, eq. (19).

$$MTBF = \frac{\text{Tempo Total em Funcionamento}}{\text{Número de falhas}} \quad (19)$$

A unidade de medida do MTBF corresponde à mesma unidade de tempo utilizada para o registro do tempo de funcionamento do sistema. O objetivo é alcançar um valor elevado de MTBF, utilizando o Tempo Total de Funcionamento como métrica de referência. Quanto mais próximo o MTBF estiver do Tempo Total de Funcionamento, mais satisfatório será o desempenho do sistema. Para atingir esse resultado, é essencial que o número de falhas seja minimizado.

Esse KPI é fundamental para a análise da manutenção preditiva e para planejar atividades de manutenção, pois vai indicar o tempo adequado para realizar a intervenção antes da falha.

Por exemplo:

Um sistema de painéis solares térmicos é instalado em um edifício residencial para aquecer água. Nessa região a poeira acumula-se rapidamente, e como os moradores não possuem uma fonte secundária para aquecer a água, sabem que o sistema precisa de intervenção quando a água arrefece. O síndico do edifício liga para uma equipa de manutenção sempre que necessário e assim foi feito nos intervalos de 3 meses, 2 meses e 4 meses, totalizando 3 falhas nesse período. Uma proposta de manutenção preventiva foi elaborada, de modo que intervenham antes da falha, mas para saber o momento ideal da intervenção será aplicando o MTBF:

Para simplificar os cálculos de modo conveniente, será adotado dias como unidade de tempo. 90 dias (3 meses) + 60 dias (2 meses) + 120 dias (4 meses) = 270 dias. Aplicando os valores na equação (20), tem-se:

$$MTBF = \frac{270}{3} = 90 \text{ dias} \quad (20)$$

Esse resultado significa que a periodicidade em que deve ser feita a manutenção são 3 meses.

Ainda segundo Keepfy (2022), é recomendado utilizar uma margem de segurança de 70%. Calculando na eq. (21):

$$90 \times 0,7 = 63 \text{ dias} \quad (21)$$

Aproximadamente dois meses, considerando a margem de segurança para intervenção preventiva antes da falha.

#### **2.7.4 MTTR - Mean Time To Repair**

O MTTR mede o tempo médio que leva para reparar um equipamento após uma falha. De acordo com Keepfy (2022) o cálculo do MTTR é feito dividindo o tempo de operação pelo número de falhas, equação (22).

$$MTTR = \frac{\text{Tempo Total em reparação}}{\text{Número de falhas}} \quad (22)$$

De modo análogo ao MTBF, a unidade de medida será o tempo adotado pelas reparações, mas no MTTR o ideal é que seja o menor possível, matematicamente isso é possível aumentando o número de falhas ou diminuindo o tempo total em reparação, e como busca-se o mínimo de falhas, o tempo total de reparação precisa ser reduzido para que o MTTR seja baixo.

Um MTTR baixo sugere que a equipa de manutenção é eficiente na resolução de problemas, minimizando o tempo de inatividade do equipamento.

Em uma situação prática o tempo de reparo, demonstra o quanto a empresa deixa de ganhar com o ativo avariado.

Continuando o exemplo anterior para situação do MTTR:

Para decidir se iria adjudicar a proposta de manutenção preventiva aos coletores do edifício, o síndico parou para calcular o MTTR, nos 270 dias, houve 3 falhas, que para serem reparadas levavam 4 horas, mas até os técnicos chegarem passava-se meio-dia (12h), um dia (24h), ou dois dias (48h).

Assim, na equação (23), o tempo total em reparação foi calculado considerando um tempo total em reparação de  $(4+12) + (4+24) + (4+48)$ , ou seja, 96 horas.

$$MTTR = \frac{96}{3} = 32 \text{ h} \quad (23)$$

Essas 32 horas representam o tempo em que os moradores ficam sem água quente e precisam recorrer um chuveiro elétrico de 4000W instalado nas 10 casas do condomínio.

Assumindo duas pessoas por casa, durante as 32 horas, tomaram 3 duches de 10 minutos, cada pessoa. Ou seja  $3 \text{ (duches)} \times 2 \text{ (pessoas)} \times 10 \text{ (minutos)} \times 10 \text{ (apartamentos)} = 600 \text{ minutos}$  ou 10 horas.

De acordo com Selectra (2024), o preço do kWh em Portugal é em média 0,17€, assim, para os 40kW consumidos em 10horas, o valor pago foram de 6,8€.

Sendo um valor baixo, foi decidido que as manutenções seriam feitas apenas quando necessário.

Nesse caso, os custos foram de 6,8€ por falha. Mas em indústrias que possuem máquinas que estão sempre a funcionar, 32horas de inatividade podem representar uma perda de milhares de euros.

### **2.7.5 MTTF - Mean Time To Fail**

Este indicador representa uma média do tempo de trabalho do ativo antes da sua falha, esse KPI é usado em ativos que não podem ser reparados, como lâmpadas e

baterias. O intuito é prever a sua vida útil e determinar quando as substituições devem ser consideradas.

Segundo Nati (2024), o MTTF é calculado dividindo o tempo total em operação pelo número de ativos utilizados, ou seja, uma média aritmética do tempo de funcionamento de todos os ativos, equação (24).

$$MTTR = \frac{\text{Tempo Total em operação}}{\text{Número de ativos}} \quad (24)$$

O MTTF é um indicador crucial para o gerenciamento de ativos, pois permite prever quanto tempo um equipamento ou peça de reposição durará antes da falha. Esse planejamento é útil para desenvolver uma estratégia de manutenção preventiva, uma vez que, ao identificar o período provável de falha, as empresas podem programar inspeções regulares e realizar substituições antes que ocorra uma falha. Optar por peças com um MTTF mais alto, mesmo que inicialmente mais caras, pode reduzir a frequência de substituições e, ao longo do tempo, aumentar a lucratividade. A gestão de *stock* também é abrangida, permitindo que a empresa mantenha apenas as peças em reserva, evitando tanto a falta quanto o excesso de *stock* (Nati, 2024).

Por exemplo:

Uma empresa instala 10 lâmpadas em um depósito e deseja saber quanto tempo, em média, cada lâmpada funcionará antes de falhar. Uma equipa fez o monitoramento e anotou na Tabela 12, os tempos de funcionamento de cada lâmpada:

Tabela 12 - Tempo de operação das lâmpadas

Lâmpada	Tempo de Operação (horas)
1	800
2	1.200
3	1.100
4	950
5	1.300
6	1.100
7	900
8	1.050
9	1.250
10	1.000
Total	10.650 horas

O cálculo do MTTF é feito considerando as 10.650 horas e as 10 lâmpadas, eq. (25).

$$MTTR = \frac{10650}{10} = 1065 \text{ h} \quad (25)$$

Com essa média, a empresa consegue planejar as substituições, a cada 1065 horas de modo a garantir que o ambiente permaneça iluminado.

### 2.7.6 Disponibilidade Física das Máquinas

Este KPI mede a percentagem do tempo em que um equipamento está disponível para operação, o que é diferente da fiabilidade que trata-se da probabilidade do ativo estar disponível para executar a sua função. O cálculo da Disponibilidade é feito segundo Keepfy (2022) a partir do MTBF e do MTTR, equação 26.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (25)$$

A disponibilidade não tem unidade de medida de tempo, é uma percentagem que significa o quanto aquele ativo operou durante o tempo em que ficou ligado.

No exemplo do solar térmico do condomínio, considerando que o motivo da falha tivesse sido uma bomba circuladora que avariou, ao calcular sua disponibilidade na equação (26), tem-se que:

MTBF: 90 dias = 2160 horas

MTTR: 32 horas

$$\text{Disponibilidade} = \frac{2160}{2160 + 32} \times 100 = 98,54\% \quad (26)$$

Ou seja, naquele período, a bomba trabalhou 98,54%. O que está ótimo, já que para padrões globais, acima de 90% é considerado uma boa disponibilidade, de acordo com Keepfy (2022).

### 2.7.7 Custo de Manutenção por Faturação - CMF

Esse KPI é essencial para avaliar a eficiência dos investimentos em manutenção, que para Keepfy (2022), esses gastos são com pessoal, materiais, subcontractações, depreciação e perda de faturamento. A ideia é perceber se os gastos em manutenção estão proporcionalmente alinhados com o desempenho financeiro.

Calculado na equação (27), dividindo o custo total de manutenção pelo faturamento bruto.

$$CMF = \frac{\text{Custo total de manutenção}}{\text{Faturamento bruto}} \quad (27)$$

Se o valor for elevado, isso pode indicar que a empresa gasta muito com manutenção e consequentemente isso faz com que os seus preços sejam mais altos e assim perde-se competitividade em comparação aos concorrentes. Por outro lado, um valor baixo pode sinalizar eficiência operacional, mas também pode ser reflexo de um investimento insuficiente em manutenção. Essa falta de investimento pode levar a falhas inesperadas, comprometendo a confiabilidade dos ativos e gerando custos adicionais no longo prazo.

Por exemplo:

Uma usina de energia solar gera receita ao vender a eletricidade produzida para o mercado. No último ano, a usina teve uma receita de 3 milhões de euros, mas para manter as instalações, são feitas atividades de manutenção que incluem a limpeza dos painéis, reparação em inversores, e monitoramento dos sistemas e substituição de peças. Nesse mesmo ano a empresa gastou 180 mil euros em manutenção.

O diretor financeiro da usina gostaria de saber se está a direcionar muito dinheiro para as atividades de manutenção. Então, na equação (28) calcula o Custo de Manutenção por Faturação.

$$CMF = \frac{180000}{3000000} = 0,06 \text{ ou } 6\% \quad (28)$$

Esse valor representa que a manutenção custou 6% do faturamento gerado. Para saber se isso é bom ou ruim, segundo Keepfy (2022), as empresas realizam um *benchmarks* com as indústrias do ramo ou estabelecem metas internas com base em seu contexto específico.

### **2.7.8 Custo de Manutenção por Valor de Reposição - CMVR**

Uma empresa através de estudos e indicadores pode avaliar sobre a viabilidade económica de substituir ou manter um ativo, um desses indicadores que auxiliam na tomada de decisão é o KPI – Custo de Manutenção por Valor de Reposição. Esse índice é calculado na equação (29) dividindo o custo de manutenção pelo valor de reposição do ativo.

$$CMVR = \frac{\text{Custo Total de Manutenção}}{\text{Custo de aquisição do novo ativo}} \quad (29)$$

De acordo com Idhammar (2020), a métrica buscada está entre 2% a 3% como o ideal, sendo 6%.

Segundo Keepfy (2022), o valor máximo aceitável. Nesse caso ultrapassado esse valor indicaria que um novo ativo é mais interessante, entretanto, antes da compra, se faz necessário a avaliação de outros indicadores por exemplo os de ciclo de vida.

Um exemplo de aplicação do Custo de Manutenção por Valor de Reposição pode ser aplicado em um parque eólico onde existem aerogeradores ao fim do ciclo de vida, o que resulta em rotinas de manutenção com mais frequência. Foi estimado que em um ano os custos para manter em operação cada aerogerador ultrapassado era de 80 mil euros, enquanto a substituição por um novo, custaria em média um milhão de euros.

Aplicando na equação (30):

$$CMVR = \frac{80000}{1000000} = 0,08 \text{ ou } 8\% \quad (30)$$

Nesse exemplo, o custo de manutenção anual representa 8% do valor de reposição da turbina. Como ultrapassa o valor crítico é recomendado a substituição, uma vez que não é viável continuar com as atividades de manutenção já que substituição da turbina pode se tornar uma opção mais econômica.

Um dos KPI's amplamente conhecidos e ligados ao mundo da manutenção é o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), nesse indicador é avaliado a efetividade global de um equipamento, ou seja, será comparado a quantidade de itens produzidos em condições aceitáveis, com a quantidade de itens bons que o equipamento tem capacidade para produzir, sendo um indicativo de qualidade.

Para o cálculo do OEE, na equação (31) são multiplicadas três taxas:

$$OEE = Disponibilidade \times Performance \times Qualidade \quad (30)$$

**Disponibilidade:** Mede o tempo de operação efetiva do equipamento versus o tempo em que deveria estar disponível. O que faz o OEE estar ligado a manutenção.

**Performance:** Observa se o equipamento opera na sua capacidade ideal.

**Qualidade:** Foca nos produtos conformes, dentro dos padrões de qualidade.

Um exemplo prático da aplicação do OEE pode ser observado considerando um aerogerador de 1 MW, em um dia de manutenção:

**Disponibilidade:** A turbina deveria operar 24/24 horas, mas ocorreu 2 horas de parada para manutenção, deixando-a em operação por 22 horas. Assim, a disponibilidade é calculada na equação (31), por:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{22}{24} = 0,916 \text{ ou } 91,6\% \quad (31)$$

**Performance:** Nesse dia, devido à imprevisibilidade do vento, a turbina operou em média a 80% da sua capacidade nominal, gerando 0,8 MW em vez de 1 MW. A performance é, portanto 80%.

**Qualidade:** Considerando as 22 horas de trabalho a 80% da capacidade, foram gerados 17,6 MWh ao longo do dia, mas devido a problemas de eficiência na conversão de energia. 0,2 MWh foram perdidos. Então, a qualidade é obtida por meio da equação (32):

$$\text{Qualidade} = \frac{17,4}{17,6} = 0,988 \text{ ou } 98,8\% \quad (32)$$

Assim, o cálculo do OEE é dado pela equação (33):

$$OEE = 91,6\% \times 80\% \times 98,8\% = 72,4\% \quad (33)$$

Este KPI orienta a equipa sobre como pequenas melhorias em disponibilidade e performance podem aumentar a eficiência geral do parque.

Com a coleta de dados ao longo do tempo, todos os KPI's abordados têm a possibilidade de criar históricos que permitem verificar tendências e realizar análises de desempenho. O acompanhamento desses indicadores pode ser feito utilizando por exemplo, ferramentas estatísticas gráficas, como a carta de controlo. Esses gráficos podem ser gerados de forma automatizada a partir de um *Computerized Maintenance Management System* (CMMS), um *software* dedicado à gestão da manutenção onde o gestor alimentará a plataforma com dados como quantidade de falhas, tempo de reparo, intervalos de manutenção, peças substituídas, entre outros, e o CMMS gere os dados apresentando indicadores para tomada de decisões para aumentar eficiência da manutenção ao longo do tempo.

Como exemplo de CMMS, conhecidos, no trabalho de Pereira (2018), são mencionados:

IBM Maximo, como o *software* de manutenção com maior implantação e líder de mercado, Figura 35. Desenvolvido pela *International Business Machines* (IBM), o *software* possibilita expansões e abrange vários módulos como, gestão de trabalho, gestão de inventário, gestão de recursos, etc.

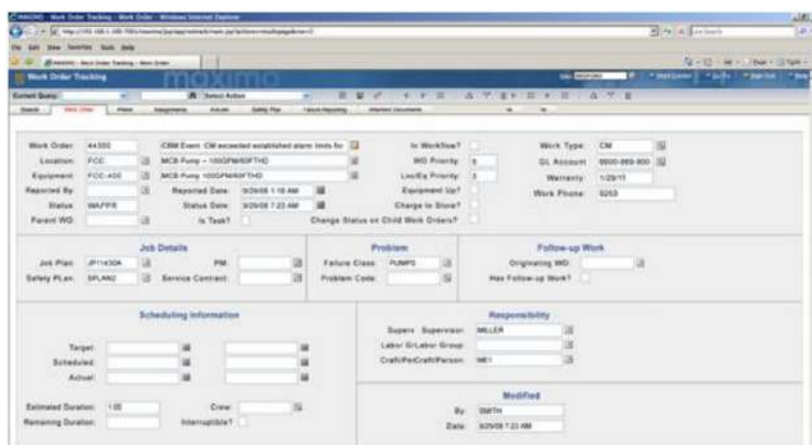


Figura 35 - Interface do *software* IBM Maximo.

Fonte: (Pereira, 2018)

Primavera é outro exemplo de CMMS mencionado no trabalho de Pereira (2018), o *software* foi desenvolvido pela empresa Primavera *Business Software Solutions*, S.A, Figura 36.



Figura 36 - Interface do *software* Primavera.

Fonte: (Pereira, 2018)

Assim como o IBM Maximo, o Primavera apresenta módulos como Objetos de Manutenção, Materiais, Histórico de Avarias, etc.

Outros CMMS, conhecidos e abordados no trabalho de Pereira (2018), são o SAP, ManWinWin, e o Sistema Modular Integrado de Terologia (SMIT).

Abordando análise de KPI's por meio de CMMS, um exemplo prático será apresentado.

Uma fábrica deseja otimizar os processos de manutenção e reduzir custos operacionais, adquiriram um CMMS para gestão da manutenção e ao longo de 6 meses alimentaram o *software* com os dados referentes a falhas e reparos de seus ativos, codificados com dados referentes ao tipo, número e localização.

Abaixo, tem-se a Tabela 13, referente a terceira Unidade de Tratamento de Ar (UTA) do lado West, piso 4.

Tabela 13 - Dados de desempenho da UTA.

**UTA. 4W. 03**

Mês	Falhas	Tempo em Reparos (h)	Tempo de Operação (h)
Jan	5	15	1250
Fev	3	6	780
Mar	6	24	1440
Abr	4	14	980
Mai	5	12,5	1275
Jun	4	12	1000

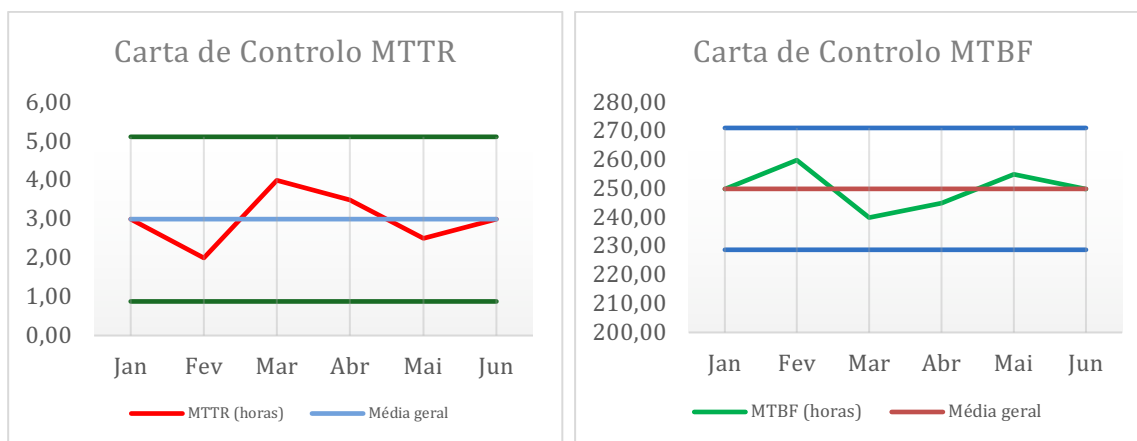
Após inserção dos dados, o CMMS apresentou a Tabela 14 para o monitoramento simultâneo do tempo médio entre falhas (MTBF) e o tempo médio de reparo (MTTR).

Tabela 14 - Indicadores de desempenho para cada mês.

Mês	MTTR (h)	Média geral	LCS	LIC
Jan	3,00	3,00	5,12	0,88
Fev	2,00	3,00	5,12	0,88
Mar	4,00	3,00	5,12	0,88
Abr	3,50	3,00	5,12	0,88
Mai	2,50	3,00	5,12	0,88
Jun	3,00	3,00	5,12	0,88

Mês	MTBF (h)	Média geral	LCS	LIC
Jan	250,00	250,00	271,21	228,79
Fev	260,00	250,00	271,21	228,79
Mar	240,00	250,00	271,21	228,79
Abr	245,00	250,00	271,21	228,79
Mai	255,00	250,00	271,21	228,79
Jun	250,00	250,00	271,21	228,79

E de forma a visualizar melhor os resultados e identificar variações, foi solicitado os gráficos da Carta de Controlo, método visual para monitorar se o processo está estável ao longo do tempo. Esse acompanhamento é feito pelo posicionamento dos valores entre a linha central representada pela média como o valor ótimo buscado, e os limites de controlo superior e inferior, que são calculados com base na média e no desvio padrão dos dados (R. Silva, 2019).



a)

b)

Gráfico 7 - Cartas de controlo para um período de 6 meses: a) MTTR; b) MTBF.

Interpretando os gráficos é visto que o tempo médio entre falhas e o tempo médio de reparo, estão sob controlo e não apresentam problemas fora dos limites

estabelecidos. Isso indica que o intervalo entre falhas, bem como o tempo para reparar é estável e previsível.

Até então, foram abordados os conceitos dos indicadores de desempenho, métricas que avaliam a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de manutenção. Eles quantificam o desempenho para ajudar a entender a eficácia dos processos. Entretanto no universo da manutenção existem diversas outras terminologias que constantemente são ouvidas, mas se enquadram em classificações complementares, nomeadamente ferramentas e filosofias/metodologias de gestão.

Para Lerzoni Consultoria e Escola de Negócios (2018), as ferramentas de gestão incluem metodologias específicas que auxiliam na resolução de problemas e na otimização dos processos. Essas ferramentas são aplicadas para manter a organização e a segurança no local de trabalho, além de facilitar a comunicação de problemas em tempo real, o que ajuda a reduzir paradas e a prevenir falhas. Como exemplo tem-se método 5S e a análise *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA).

As filosofias e metodologias fornecem a estrutura de pensamento que guia toda a política de manutenção, promovendo uma cultura de melhoria contínua e eficiência (Xavier, 2024).

Algumas das mais aplicadas podem ser descritas brevemente por:

- *Lean Manufacturing*: Eliminação desperdícios e maximizar o valor do produto.
- *Just-In-Time* (JIT): Produzir somente o necessário no momento certo, evitando stocks.
- *Total Productive Maintenance* (TPM): Envolvimento de todos para melhorar a eficiência da produção.
- Kaizen: Melhoria contínua, focada em pequenas mudanças.
- *Six Sigma*: Melhoria da qualidade, com foco em reduzir variação e defeitos.

## 2.8 Metodologia

As métricas discutidas anteriormente são essenciais para a gestão de desempenho, permitindo não apenas avaliar a fiabilidade dos sistemas, mas também analisar o impacto económico das estratégias de manutenção. Para as tecnologias renováveis, a monitorização contínua e a aplicação de práticas de manutenção eficientes são fundamentais para garantir um bom desempenho ao longo de sua vida útil, além de maximizar o retorno financeiro.

Com base nesses conceitos, o capítulo a seguir apresenta a metodologia adotada, que fundamenta-se nas métricas e práticas discutidas para avaliar os sistemas de energia solar fotovoltaica e térmica. A abordagem metodológica considera as especificidades dessas tecnologias e busca avaliar sua viabilidade técnica e económica tanto em Portugal quanto no Brasil.

O foco na energia solar está inserido em um contexto mais amplo de inovação tecnológica e demanda por fontes de energia renováveis. A energia solar, tanto térmica quanto fotovoltaica, tem se destacado como uma das alternativas mais promissoras para a transição energética. Em um cenário de busca por desenvolvimento sustentável, as políticas globais estão cada vez mais direcionadas para a ampliação da matriz energética renovável, com ênfase na meta de emissões líquidas zero de carbono até 2050. Nesse contexto, espera-se um crescimento significativo na produção de energia solar, especialmente com a popularização da microgeração, que permite a aplicação direta pelo consumidor final, conforme destacado pela Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD, 2023).

### **2.8.1 Energia Solar Fotovoltaica**

No início do século XX, a física clássica não conseguia explicar alguns fenômenos observados experimentalmente. Um desses fenômenos era o efeito fotoelétrico, estudado e experimentado por Albert Einstein, o que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1921 por sua explicação teórica do efeito fotoelétrico, um fenômeno no qual elétrons são emitidos de um material (geralmente metálico) quando ele é exposto à luz (Silveira, 2022).

Um sistema de energia fotovoltaico converte a luz solar diretamente em eletricidade através de células fotovoltaicas. Essas células, geralmente feitas de silício, captam fótons da luz solar e liberam elétrons, gerando uma corrente elétrica (Iberdrola, 2024).

A luz do sol é uma forma de radiação eletromagnética, o que inclui a radiação visível, ultravioleta e infravermelha, que são captadas pelos painéis solares. Mesmo em dias nublados, embora a produção de energia seja menor do que em dias ensolarados, os painéis fotovoltaicos produzem energia pois não precisam de luz direta, mas sim de radiação solar na forma de radiação visível e radiação ultravioleta, a radiação infravermelha produz e não é convertido em eletricidade (Cambio Energético, 2024).

De acordo com Iberdrola (2024), existem dois tipos de produção fotovoltaica, as gerações ligadas a rede (*on grid*), e as que são independentes chamadas de *off-grid*.

Quando ligada a rede, o consumidor pode de igual forma produzir mais do que consome e vender o excedente a rede elétrica, como também pode comprar eletricidade quando a sua produção não supera o consumo. Em lugares remotos, onde não há rede elétrica, a produção fotovoltaica, necessita de elementos adicionais para garantir um fornecimento constante de energia, como baterias e reguladores para proteger as baterias de sobrecarga.

No mais, um sistema fotovoltaico é composto por dois elementos básicos, painéis e inversores, Figura 37.

A eletricidade gerada pelas células solares é em corrente contínua (CC), mas a maioria dos eletrodomésticos e da infraestrutura elétrica utiliza corrente alternada (CA). Para

que a energia gerada pelos painéis solares seja utilizável em uma residência ou empresa, ela precisa ser convertida em CA, e isso é feito por um inversor solar (Alonso, 2024).

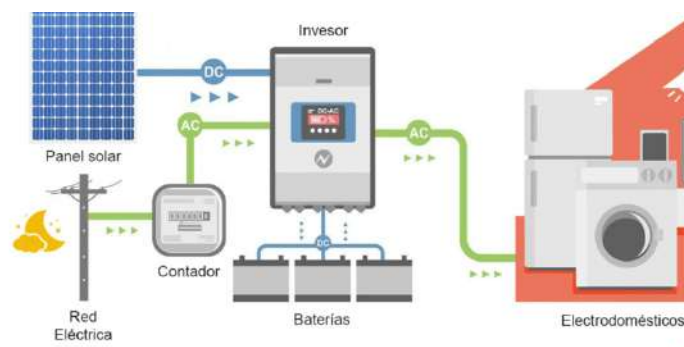


Figura 37 - Elementos de um sistema fotovoltaico.

Fonte: (Alonso, 2024)

As células/painéis fotovoltaicos em geral, são feitas de silício, um semicondutor que, quando exposto à luz solar, realiza o efeito fotovoltaico. Esse efeito ocorre quando os fótons (partículas de luz) colidem com os átomos de silício na célula, liberando elétrons. Esse movimento gera uma corrente elétrica contínua (CC).

Os painéis solares são formados por células conectadas em série ou paralelo de modo a aumentar a produção de energia, conforme Figura 38.

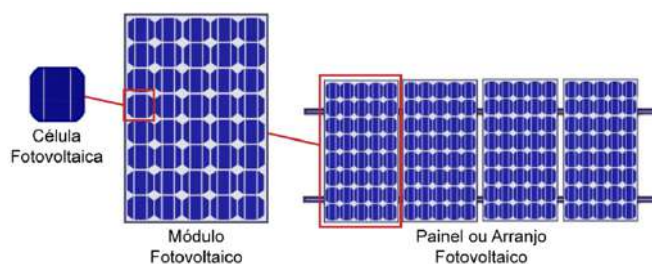


Figura 38 - Composição dos painéis fotovoltaicos.

Fonte: (Moraes, 2020).

Segundo o Portal Solar (2024), a maior parte dos painéis utilizados em instalações residenciais são com potências de 510W<sub>p</sub>, 550W<sub>p</sub> e 545W<sub>p</sub>.

E para calcular a quantidade de eletricidade gerada por cada painel, de acordo com Solfácil (2024), usa-se a equação (34).

$$\text{Energia gerada} = \text{Potência do Painel} \times \text{N.}^{\circ} \text{ de horas de Sol} \times \text{eficiência} \quad (34)$$

Por exemplo, para um painel com 550W<sub>p</sub> que capita 5 horas de sol por dia e tem uma eficiência de 80%, é capaz de fornecer em um dia, 2,2 kW ou em um mês 66 kW. Sendo necessários 5 painéis para uma habitação que consome 350 kW/mês.

## 2.8.2 Energia Solar Térmica

O solar térmico é uma tecnologia que utiliza também a radiação solar, neste caso a radiação infravermelha, que é aplicada para aquecer a água para uso em chuveiros, piscinas e aquecimento de ambientes. Ao substituir o uso de gás ou eletricidade para aquecer água, esses sistemas ajudam a reduzir custos de energia a longo prazo.

A utilização da energia solar para aquecer água de forma mais sistemática começou no século 19, quando o engenheiro americano Clarence Kemp patenteou um dispositivo para capturar a radiação solar e aquecer a água, Figura 39. O modelo patenteado foi um dos primeiros sistemas de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água, embora antes já houvesse experimentos nessa área (*National Inventors Hall of Fame, 2024*).



Figura 39 - Solar Térmico patenteado por Clarence Kemp.

Fonte: (Smyth *et al.*, 2006)

Desde então, com o crescimento da consciência ambiental e a pesquisa em energias renováveis, o uso de sistemas solares térmicos se expandiu e hoje, o aquecimento solar de água é uma tecnologia consolidada em muitos países, especialmente em regiões ensolaradas, sendo uma das formas mais acessíveis e sustentáveis de gerar calor.

Existem diversos tipos de sistemas solar térmico, dependendo da tecnologia, do tipo de fluido e da aplicação. De acordo com Ecofener (2023), os sistemas solares térmicos em sua maioria são utilizados para produção de Água Quente Sanitária (AQS), contudo existem modelos que abrangem outras funções como climatização de espaços ou piscinas e ainda para fins comerciais e agrícolas.

Esses modelos são distintos não somente pela finalidade, mas também a nível tecnológico para a circulação de fluido, permuta de calor e tipo de coletores.

Quanto aos tipos de circulação, tem-se os tipos:

Termossifão: Esse sistema utiliza o princípio de circulação natural, onde a água se movimenta sem a ajuda de uma bomba. O fluido circula devido à diferença de densidade entre água quente e fria. A água aquecida, menos densa, sobe para o reservatório, enquanto a água fria desce para os coletores para ser aquecida novamente, Figura 40. Esse tipo é amplamente usado em residências, é econômico e fácil de manter. É ideal para locais onde o tanque pode ser instalado acima dos coletores (Macolis, 2024).

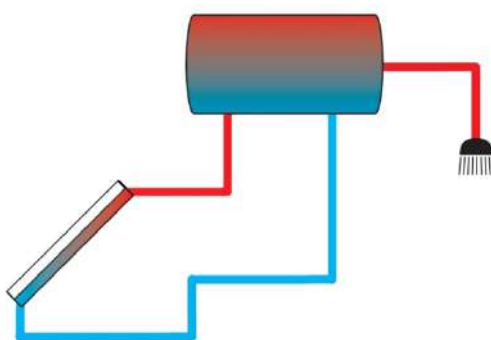


Figura 40 - Circulação de água pelo método termossifão.

Fonte: (Macolis, 2024)

Sistema solar forçado: Ao contrário do termossifão, o sistema de circulação forçada utiliza uma ou mais bombas circuladoras para deslocar o fluido entre os coletores e reservatório, Figura 41, permitindo que os componentes fiquem em diferentes níveis ou locais. Ele é mais versátil e permite instalações em edifícios e em sistemas maiores, como hotéis e fábricas. Esse sistema também possui centrais de controle para regular a circulação do fluido, melhorando a eficiência, especialmente em instalações grandes (Macolis, 2024).

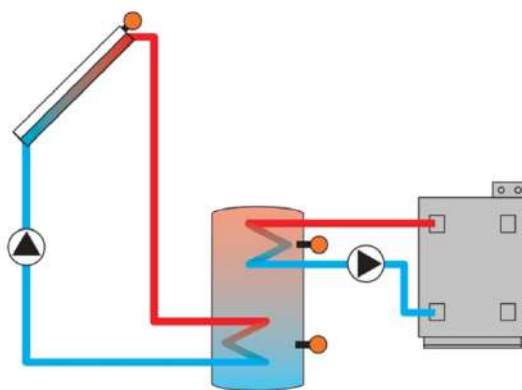


Figura 41 - Circulação de fluido com intervenção da bomba.

Fonte: (Macolis, 2024).

Em um sistema solar térmico, o fluido aquecido no coletor pode ou não, ter contato direto com a Água Quente Sanitária (AQS) do reservatório, isso independente do tipo de circulação. Nos sistemas de circuito aberto, a própria água da rede circula pelos coletores, sendo aquecida ali e depois armazenada no reservatório para uso

futuro, como acontece na Figura 39, e que também poderia ocorrer utilizando uma bomba circuladora.

Nos circuitos fechados um fluido térmico circula dentro do coletor e aquece a água por meio de um permutador de calor, sem que o fluido tenha contato direto com a AQS, assim como na Figura 40. O uso de um fluido anticongelante é essencial para evitar que no inverno o mesmo congele, ou em climas quentes, evapore saindo pelos purgadores. Esse fluido térmico é geralmente uma mistura de água com propilenoglicol ou etilenoglicol, que são substâncias com pontos de congelamento muito mais baixos e pontos de ebulição mais altos que a água (Carvalho, 2014).

Os elementos principais de um solar térmico são o depósito de água e o coletor, entretanto em sistemas mais complexos se faz necessário outros componentes, como as bombas circuladoras, depósito de fluido térmico, vaso de expansão, grupo de segurança etc. De todos os elementos, o coletor é o que sofre maiores variações para uma melhor captação de calor, existindo vários modelos adequados a fins específicos.

De acordo com Vazzoler (2021), os coletores de placas planas são os mais comuns em sistemas residenciais e comerciais, eles possuem uma superfície plana e absorvente, geralmente coberta por vidro temperado, que captura a radiação solar e a converte em calor. Sua construção é relativamente simples e o custo é acessível, Figura 42.



Figura 42 - Coletor do tipo Placa Plana.

Fonte: (Loureiro, 2022)

Os coletores de tubo de vácuo, Figura 43, utilizam tubos de vidro com um espaço de vácuo entre as camadas para agir como um isolante térmico, minimizando a perda de calor para o ambiente. São mais eficientes que os coletores de placas planas em regiões frias, sendo ideais para locais com invernos rigorosos. Apesar de serem mais caros, são duráveis e altamente eficazes em climas frios e nublados (Vazzoler, 2021).



Figura 43 - Coletor do tipo tubo de vácuo.

Fonte: (Adaptado de Loureiro, 2022)

Coletores do tipo concentradores, de acordo com Malagueta (2012), são os que utilizam superfícies refletoras, como espelhos parabólicos, para concentrar a luz solar em um único ponto ou linha, onde o fluido é aquecido a temperaturas elevadas. São extremamente eficientes em gerar calor de alta intensidade e são ideais para processos industriais e usinas de energia solar. No entanto, exigem controle preciso e manutenção regular, além de áreas amplas e de alta incidência solar para operar eficientemente, Figura 44.



Figura 44 - Coletor do tipo concentrador.

Fonte: (Vazzoler, 2021).

Coletores para aquecimento de piscina, Figura 45, são feitos de materiais plásticos ou de borracha, que resistem bem à corrosão, o que os torna simples, eficazes e acessíveis. A água da piscina passa diretamente pelos coletores, onde é levemente aquecida pelo calor do sol e em seguida retorna à piscina (Vazzoler, 2021).



Figura 45 - Coletor para piscina.

Fonte: (Vazzoler, 2021)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em Portugal, comumente é visto nas habitações que o fornecimento de Água Quente Sanitária (AQS) é proveniente de um esquentador ou caldeira mural que funciona com a queima do gás natural ou propano, por exemplo. Com o avanço da eletrificação, nota-se a chegada dos termoacumuladores e bombas de calor.

O esquentador e a caldeira mural, funcionam com o mesmo princípio, sendo a diferença que os esquentadores são apenas aplicados para produção de AQS, enquanto as caldeiras, são utilizadas para produção de AQS e aquecimento. Sua identificação nas habitações pode ser feita rapidamente pela quantidade de entradas e saídas de tubagens.

Com a eletrificação, a produção de AQS passou também ser feita por meio dos termoacumuladores e bombas de calor. Os termoacumuladores ou cilindros como são conhecidos, funcionam armazenando a água que é aquecida por meio de uma resistência elétrica, enquanto as bombas de calor fornecem a água quente por meio do ciclo de refrigeração, para a produção de água quente ou fria. Entretanto, pode-se também adotar a utilização de uma resistência elétrica em complemento ao sistema, sendo uma fonte alternativa, conforme ilustrado na Figura 46.

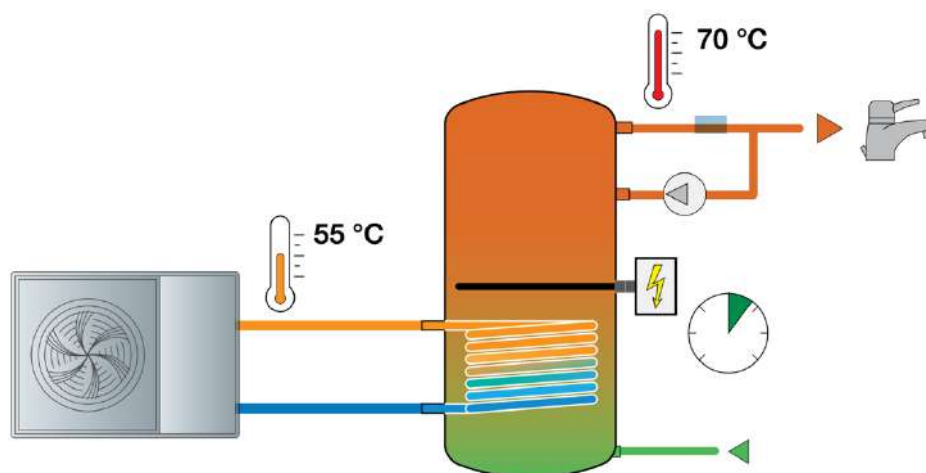


Figura 46 - Produção de AQS através da eletrificação.

Fonte: (Caleffi, 2023)

Nos modelos mais completos das bombas de calor e termo acumuladores, são encontrados permutadores extra, para serem adicionadas fontes externas de energia térmica como o exemplo de um sistema solar térmico, que de acordo com a Vulcano, permite uma redução de até 75% na fatura de aquecimento de águas sanitárias, chegando aos 100% nos meses de maior exposição solar (Bosch Termotecnologia, 2024).

No Brasil, de acordo com Enerbras (2023), o meio mais comum para obter água quente é o uso do chuveiro elétrico, Figura 47. Essa popularidade se deve à facilidade

de instalação, custo relativamente baixo e a eficiência na entrega de água quente quase instantaneamente.



Figura 47 - Chuveiro elétrico.

De acordo com Caneppele (2021), o chuveiro elétrico é responsável por cerca de uma média de 23% do gasto mensal em energia elétrica nas residências brasileiras. Acima dessa média, encontra-se uma residência familiar no recôncavo da Bahia, na qual metade do consumo elétrico é responsável pelo chuveiro.

Quando se fala em energias renováveis, as principais fontes produtoras a nível mundial e industrial já foram mencionadas, na tabela 3, são elas as Hidrelétrica, Eólica, Solar Fotovoltaica, Geotérmica, Solar Térmico, Maré, Onda, Oceano. Grandes empresas fazem investimentos nesse tipo de tecnologia com fins comerciais, produzem a “energia verde” para vendê-la aos consumidores finais. Ao fugir da ótica dos grandes empreendimentos e olhando para o consumidor individual, que utiliza diariamente a eletricidade em sua habitação, é possível para esse, também produzir sua própria energia por meio da produção descentralizada, para isso os meios disponíveis para o pequeno produtor são:

**Biomassa:** Usada principalmente em áreas rurais para produção de biogás, que pode ser queimado diretamente para os fins domésticos, ou utilizado como fonte de calor para produção de eletricidade (Ferreira, 2020).

**Energia Eólica:** Embora seja mais comum em grandes parques eólicos, a energia eólica também pode ser aproveitada por consumidores finais através de pequenas turbinas instaladas em locais adequados com ventos constantes. No entanto, essa tecnologia é menos comum para uso residencial.

**Energia Solar Fotovoltaica:** Essa é uma das opções mais acessíveis e difundida entre os consumidores finais, identificadas facilmente nos telhados das residências, empresas e indústrias.

Considerando o caso brasileiro, para reduzir a fatura de eletricidade, o cliente final tem disponíveis duas hipóteses, a utilização de painéis fotovoltaicos onde será produzida a eletricidade necessária para a habitação, ou a instalação de um sistema solar térmico para obtenção apenas de água quente sanitária, o que já reduziria o consumo de forma considerável, já que a obtenção de água quente na maior parte dos casos é feita por resistência elétrica.

Considerando uma habitação familiar numerosa onde vivem 8 pessoas, a fim de comparação, foram realizados pedidos de cotação para o fornecimento e instalação de um sistema fotovoltaico e um sistema solar térmico.

Tendo em conta que o pedido foi feito no Brasil, onde a moeda local é o Real (R\$), a conversão para Euro (€) foi realizada considerando a cotação do dia 08 de Dezembro de 2024 onde 1€ corresponde a R\$ 6,36.

A proposta do solar térmico considera o mecanismo mais simples, por termosifão, excluindo controladores e bombas circuladoras, e apresenta duas opções em marcas distintas na qual o orçamento mínimo foi de 2.204,64€, Anexo 1. Na proposta foi considerado 4 coletores em cobre e um depósito de 800 litros em aço 304, da marca KOMECO. O mesmo material da marca SOLIS, passa a custar 2.484,77€, não incluindo a mão de obra e acessórios de instalação, Tabela 15.

Tabela 15 - Proposta Comercial Solar Térmico.

Quant.	Material	SOLIS	KOMECO
1	Reservatório 800 litros em aço 304	2.484,77€	2.204,64€
4	coletores de cobre		
	Mão de obra não incluída		

Em contrapartida, para instalação dos painéis fotovoltaicos a proposta base, Anexo 2, foi de 1.644,50€, considerando 5 módulos de 550 Wp da marca JA SOLAR e 1 inversor de 3kW modelo SG3.0RS-L da marca SUNGROW, Tabela 16.

Tabela 16 - Proposta Comercial Fotovoltaico.

Quant.	Material	JA SOLAR SUNGROW
5	Módulos JAM72S30-550	1.644,50€,
1	Inversor SG3.0RS-L	
	Mão de obra incluída	

A instalação de painéis fotovoltaicos por ter um preço inferior, torna-se uma solução mais viável devido a cobertura de todo o consumo elétrico incluindo o fornecimento de água quente, mas em ambos os casos, ao utilizar painéis fotovoltaicos ou painéis solares térmicos, o investimento seria elevado. O que levou a decisão de investigar e aplicar como caso de estudos o desenvolvimento e instalação de um sistema solar térmico para uma habitação, levando em consideração a acessibilidade e sustentabilidade do projeto, dessa forma será possível fomentar o conhecimento e informação desse tipo de tecnologia e ainda aplicar de forma prática os indicadores de desempenho e financeiros quando comparados com as soluções do mercado. Ainda, será possível com esse caso de estudos aplicar e comparar as análises de ciclo de vida e políticas de manutenção.

A residência em estudo possui um chuveiro de potência variável que consome 4000Wh, considerando as 8 pessoas que lá moram e as duchas diárias que levam em média 8 minutos de uso contínuo de água, o consumo elétrico mensal apenas em

água quente corresponde em média de 128 kW dos 230kW consumidos mensalmente, em média. O que torna o chuveiro elétrico responsável por aproximadamente 56% do consumo energético total da casa.

## 4 ESTUDO DE CASO

No decorrer deste capítulo será apresentado como foi projetado e construído um sistema solar térmico sustentável e de baixo custo, em alternativa a instalação de painéis fotovoltaicos para redução da fatura energética de uma habitação, Figura 48. Serão abordadas considerações sobre eficiência, ciclo de vida e políticas de manutenção.



Figura 48 - Solar térmico construído na habitação.

### 4.1 Implementação do Sistema em Análise

Espera-se, por meio deste projeto, abrir novas possibilidades para a utilização doméstica de fontes de energia renováveis, algo que será alcançado com a aplicação de materiais recicláveis e de baixo custo na construção desse tipo de solução. Com esse trabalho, obtendo resultados positivos, será comprovada a viabilidade nesse tipo de projeto, oferecendo uma alternativa acessível e eficiente em comparação aos sistemas industriais, que apresentam custos significativamente mais elevados.

Além dos custos, serão analisados e comparados os modelos de ciclo de vida, bem como as políticas de manutenção aplicadas ao protótipo. De forma a buscar uma diminuição de custos, otimizar o tempo e obter maior eficiência, foram aplicadas ferramentas e análises de gestão, de forma semelhante ao que acontece em corporações onde é preciso tomar decisões baseadas em indicadores.

Inicialmente, foi adotado o ciclo PDCA para avaliar a situação atual e definir os passos futuros. Na fase de planejamento foi realizado um *brainstorming* de ideias, durante essa etapa, os prós e contras de cada proposta foram analisados e organizados em tabelas, facilitando a tomada de decisões fundamentadas.

Na ideia inicial, buscando simplificar o projeto cortando custos e evitando instalações, uma hipótese seria a aplicação de um permutador de calor diretamente na tubagem de água, sendo necessário apenas a instalação de um *by pass* para a

circulação da água no teto, onde ficaria o disco coletor de calor do tipo aquecimento de piscina, Figura 49.



Figura 49 - Disco coletor do tipo aquecimento de piscinas

Fonte: (Colonial Piscinas, 2023)

Esse sistema é comumente utilizado para o aquecimento de piscinas. Nesse caso, não há ligação direta com a água da rede, pois a circulação é realizada de forma forçada utilizando a própria água da piscina, então, a medida que a água percorre o circuito, ela é gradualmente aquecida, funcionando de maneira semelhante a um sistema de circuito fechado.

Embora essa ideia tenha inicialmente parecido interessante, ela foi rapidamente descartada, pois o sistema só permitiria obter água quente por alguns segundos, ou seja, até que o volume de água do disco coletor fosse escoado. Como o sistema seria diretamente ligado à água da rede, toda vez que uma torneira fosse aberta, a água em aquecimento seria deslocada do estado de espera. E considerando que não há possibilidade de recirculação para o uso sanitário, esse sistema não apresentaria eficiência, uma vez que a água aquecida seria rapidamente descartada.

Em uma ducha por exemplo, onde a água estaria a circular de forma contínua pelo permutador, essa água ao passar pelo permutador, não teria tempo suficiente para ser aquecida, sendo necessário um tempo de espera para que o sol a aquecesse.

Para facilitar a interpretação, na Tabela 17, é listado as vantagens e desvantagens da aplicação desse sistema.

Tabela 17 - Aspectos positivos e negativos da ideia 1.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo	Baixa eficiência
Sem consumo energético	Sem controlo de temperatura
	Não armazena água quente

A próxima ideia consistiu na utilização de um reservatório, de forma que a água aquecida no disco coletor fosse acumulada para uso futuro, diferentemente do sistema anterior, em que a água permanecia em standby até que uma torneira fosse aberta, acionando a circulação e permitindo que um novo volume de água fosse aquecido. Com o uso de um depósito, a água quente passaria a circular por convecção, um fenômeno no qual os fluidos menos densos tendem a subir, como ocorre com o ar e a água. Assim, haveria uma permuta natural de calor, com a água quente substituindo a fria sempre que houvesse aquecimento.

A instalação de um depósito de água exigiria uma estrutura de suporte adequada, o que tornaria a implementação dessa ideia mais complexa, uma vez que o depósito não poderia ser instalado em qualquer parte do teto. No entanto, foi considerada a utilização da caixa d'água existente como reservatório para a água quente, o que elimina a necessidade de adquirir e instalar um novo depósito. Dessa forma, o protótipo permanece com um custo reduzido. Além disso, como a utilização de caixas d'água é comum no recôncavo da Bahia, essa solução poderia ser facilmente adaptada a outras residências, mantendo os custos de instalação baixos. Por outro lado, ao utilizar o mesmo depósito, fica toda a casa sempre com água quente apenas.

Embora tenha sido apresentada uma solução para o problema anterior, essa ideia foi descartada, porque ao utilizar a estrutura da caixa d'água para suportar o projeto, a área disponível com exposição solar se mostrou insuficiente, limitando a utilização a apenas um disco coletor. Isso comprometeria a eficiência do processo de convecção, tornando-o inadequado para fornecer a quantidade de água quente necessária para vários banhos ao longo do dia. Na Tabela 18, foram listadas as vantagens e desvantagens dessa abordagem, evidenciando as limitações do sistema em relação à demanda de água quente.

Tabela 18 - Aspectos positivos e negativos da ideia 2.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo	Baixa eficiência
Sem consumo energético	Sem controle de temperatura
Armazenamento de água	Não armazena água quente
	Necessidade de depósito
	Apenas água quente

Durante o brainstorming de ideias, para resolver a questão da baixa eficiência da convecção, foi considerada a utilização de uma circulação forçada por meio de uma bomba circuladora. De fato, essa solução funcionaria, garantindo a saída de água quente e a entrada de água fria para ser aquecida. No entanto, a utilização contínua da bomba não traria benefícios, uma vez que, devido às limitações de espaço, seria utilizada apenas um coletor de disco. Isso exigia um tempo de espera até que a água fosse aquecida. A operação contínua da bomba não permitiria que o aquecimento ocorresse, aumentando ainda o consumo de energia. Na Tabela 19, estão

apresentados os pontos positivos e negativos dessa abordagem, destacando suas limitações e impactos.

Tabela 19 - Aspectos positivos e negativos da ideia 3.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo	Baixa eficiência
	Sem controle de temperatura
Armazenamento de água	Não armazena água quente
	Necessidade de depósito
	Consumo energético
	Apenas água quente

Para evitar a necessidade de circulação contínua, foi considerada a utilização de um termostato. Este dispositivo controlaria o acionamento da bomba de acordo com uma temperatura programada, garantindo que a circulação da água ocorresse de forma controlada e eficiente. Assim, a bomba seria acionada apenas pelos minutos necessários para permitir que a água fria entrasse no coletor, substituindo a água quente, quando a água fria alcançasse a temperatura prevista, seria iniciado novamente o ciclo. Essa abordagem evitaria o gasto desnecessário de energia, tornando o processo mais eficiente. Na Tabela 20, são apresentados os pontos de vantagens e desvantagens dessa solução, destacando seus benefícios em termos de economia de energia e controle do sistema.

Tabela 20 - Aspectos positivos e negativos da ideia 4.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo	Baixa eficiência
Baixo consumo energético	Sem controle de temperatura
Armazenamento de água	Não armazena água quente
	Necessidade de depósito
	Apenas água quente

Ainda na fase de planejamento do ciclo PDCA, com a ideia definida, o próximo passo consistiu na elaboração do esboço do projeto, com o objetivo de garantir a conexão adequada de todas as peças e a aquisição dos acessórios necessários. Dessa forma, foi realizada a cotação do material inicial, para que, posteriormente, fossem adquiridos os acessórios de conexão.

Durante a cotação foi observado a possibilidade de grande redução de custos através da construção própria do disco coletor, uma vez que 105,68€, foi o preço mínimo para aquisição de um conjunto mínimo de duas unidades. Os discos coletores em questão eram da marca Girassol e possuem 1m de diâmetro, Anexo 3.

Em alternativa foi optado pela compra de um rolo de mangueira para a confeção do disco. Para aquisição da mangueira foi considerado o pressuposto de que seria mais barato que os 105,68€, valor dos discos Girassol, porém, antes da compra da mangueira que é vendida em metros, foi necessário definir a quantidade e tamanho dos discos coletores, entretanto essas questões dependiam apenas da capacidade de um suporte, que deverá ser instalado junto ao reservatório. Que tratava-se de uma edificação externa a habitação, que apenas suportava a caixa d'água, da marca Tigre e com capacidade de 1000 litros, colocando-a em uma posição elevada para utilização da gravidade para distribuição de água, Figura 50.

Como alternativa, foi optado pela compra de um rolo de mangueira para confeccionar o disco coletor. A escolha pela mangueira foi baseada na premissa de que ela seria mais económica do que os discos Girassol, que custavam 105,68€. No entanto, antes de realizar a compra da mangueira, que é vendida por metro, foi necessário definir a quantidade e o tamanho dos discos coletores, questões que dependem exclusivamente da capacidade do suporte que deveria ser instalado junto ao reservatório. Este suporte seria instalado em uma edificação externa à residência, que atualmente suporta apenas uma caixa d'água da marca Tigre, com capacidade de 1000 litros, Figura 50.



Figura 50 - Estrutura que suporta a caixa d'água.

O acesso a edificação, permitiu realizar medições de largura, altura e profundidade, Figura 51, para o dimensionamento do suporte e assim encontrar o comprimento de mangueira necessário para confeção dos discos coletores.

- Altura: 3,96 m
- Largura: 2,03 m
- Profundidade: 1,76 m

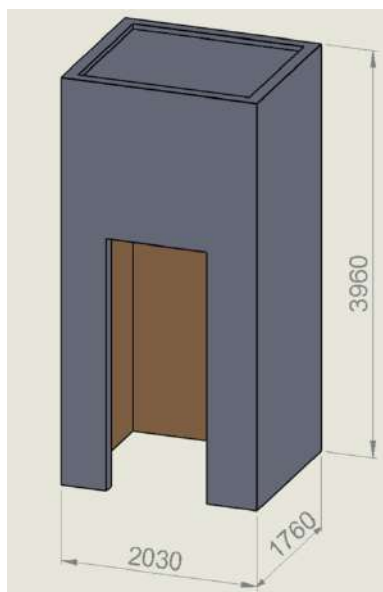


Figura 51 - Modelagem com cotas em milímetro da estrutura da caixa d'água.

Foi verificado que uma parede com largura de 1,76 m é a que recebe maior incidência solar ao longo do dia. Desta forma, para acomodar um ou mais discos coletores, o suporte será instalado nesta parede, aproveitando ao máximo a exposição solar para atualização o aquecimento da água.

Em projetos como este, onde cada etapa depende da anterior, é fundamental um planejamento cuidadoso para evitar falhas. Nesse caso, o dimensionamento da mangueira é diretamente condicionado ao dimensionamento do suporte, e este, por sua vez, depende das condições físicas da edificação que suportam a caixa d'água. Também, de modo que uma bomba garanta a circulação de água, é essencial considerar a altura máxima que ela consegue deslocar, ou seja, para evitar sobrecarga na bomba, é necessário que o suporte esteja o mais próximo possível da caixa d'água, o que também favorece uma maior captação solar, minimizando o sombreamento da área.

Além da altura, é necessário que o suporte tenha uma especificação adequada para permitir o escoamento de sujidades e águas da chuva. A sua inclinação também deve ser projetada para melhorar o aproveitamento solar, uma vez que a incidência da luz varia conforme a hora do dia, a estação do ano e a latitude. Para contribuir com a sustentabilidade, foi pensado na construção de um suporte utilizando pedaços de madeira, evitando, assim, custos com a aquisição de materiais e processos de soldadura.

Tendo como inspiração os suportes de telhado em madeira, o suporte para os discos coletores, seguiu o modelo da Figura 52.



Figura 52 - Modelo de suporte inclinado em madeira.

Fonte: (Produzida por inteligência artificial, 2024)

Para que o suporte seja funcional, é necessário que a cobertura não se estenda, o que limitaria a área útil disponível para a fixação dos discos coletores. Assim, uma área foi definida como um retângulo aproximado de 1,76 m (correspondente ao lado da estrutura) por 0,80 m, dimensão que corresponde às medidas aproximadas dos pedaços de madeira disponíveis para reutilização. Com a área útil definida, foi possível dar seguimento aos cálculos para descobrir a quantidade de mangueira a ser comprada.

O cálculo do comprimento da mangueira seria baseado no perímetro de uma espiral, formato em que seria feito o disco coletor. Para esse cálculo, algumas considerações foram admitidas. Sendo uma área útil em formato retangular, o lado menor limita o diâmetro da espiral em 0,80 m, o que faz perder o restante da área útil. Para contornar essa situação, foi pensado na utilização de uma segunda espiral com também 0,80 m de diâmetro.

Sabendo o diâmetro máximo, foi também necessário definir o diâmetro interno, uma vez que o disco coletor não poderia ter um raio curto de modo que provocasse dobras na mangueira, levando a resistência no deslocamento de água com curvas acentuadas e redução de seção. Através de métodos empíricos com um pedaço de mangueira, um diâmetro de 28 cm foi assumido como o mínimo para que não houvesse dobras e redução de caudal.

Durante a cotação, foi optado pela compra de uma mangueira com  $\frac{1}{2}$ ", devido ao custo reduzido em comparação com os outros diâmetros. Assim, em posse do diâmetro máximo, diâmetro mínimo e espessura, era possível determinar a quantidade de enrolamentos e posteriormente o perímetro. Contudo, esses cálculos envolviam a manipulação de equações diferenciais e integrais, o que tornaria o trabalho complexo e extenso. Para evitar essa situação, foi optado por simplificar e em vez de ser calculado o comprimento de uma espiral, o problema matemático transformou-se em cálculos de circunferências. A simplificação é visível quando a análise passa de toda a espiral, Figura 53 (a), para apenas um pedaço, Figura 53 (b).

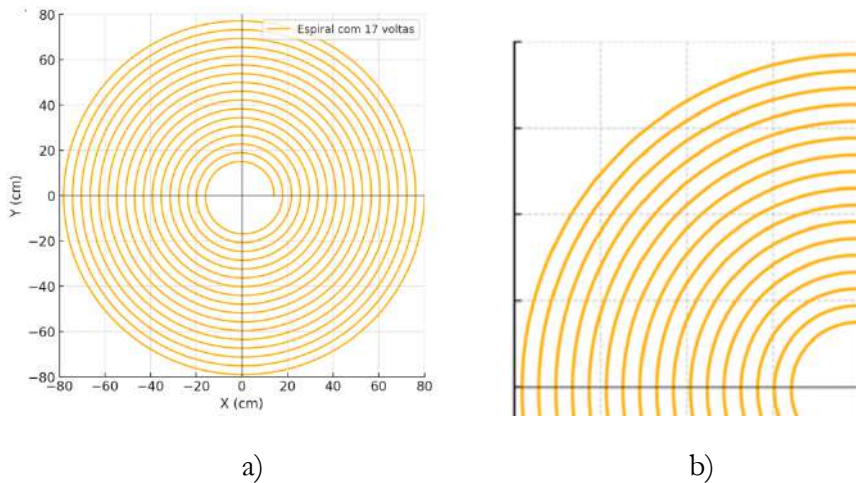


Figura 53 - Analogia entre uma espiral e círculos concêntricos: a) Espiral de Arquimedes; b) Segundo quadrante em zoom, simbolizando em círculos concêntricos.

Fonte: (Produzida por Inteligência Artificial, 2024)

Com todas as considerações assumidas, a questão a ser respondida é: Quantos metros de mangueira com  $\frac{1}{2}$ " de espessura seriam utilizados em cada espiral cujo diâmetro varia de 28cm a 80cm?

Para responder, antes é necessário conhecer o número de voltas que a mangueira dará, e para simplificar, e em um quadrante, a análise pode ser feita com o raio mínimo com 14 cm e o raio máximo com 40 cm. Utilizando a equação geral da Progressão Aritmética, eq. (35), os raios seguintes são determinados.

$$a_n = a_1 + (n - 1) \times r \quad (35)$$

Onde:

$a_n$ : Termo que busca-se

$a_1$ : Primeiro termo da progressão aritmética

$n$ : Posição do termo a ser descoberto

$r$ : Razão

A atribuição dos termos, pode ser feita ao observar a Figura 45 (b), onde:

$$a_1 = 14\text{cm (raio inicial);} \quad (36)$$

$$a_2 = a_1 + 2\text{cm} = 16\text{cm} \quad (37)$$

Considerando o diâmetro externo da mangueira ( $\frac{1}{2}$ " ), somado a uma margem para ser possível adicionar fixadores entre as revoluções, é obtido 2 cm, Razão da progressão aritmética dos raios.

$$a_3 = 18;$$

$$a_n = 40.$$

Sabendo que na posição inicial  $a_1$  o raio são 14 cm e na posição final  $a_n$  o raio é 40 cm, encontrando o valor de  $n$ , será descoberto número máximo de revoluções por espiral, equação (38).

$$40 = 14 + (n - 1) \times 2 \quad (38)$$

$$n = 13$$

De acordo com os cálculos, 13 é o número máximo de voltas por espiral, de forma a ocupar toda uma área útil disponível. Para compra da mangueira resta saber o comprimento que resulta as 13 voltas.

Regressando a equação geral da Progressão Aritmética, dessa vez para determinar o comprimento total da mangueira, considerando agora as várias circunferências produzidas com os 13 raios.

$$r_1: 14\text{cm (Raio 1);}$$

$$r_2: 16\text{cm (Raio 2);}$$

$$r_3: 18\text{cm (Raio 3);}$$

$$r_n = r_{13}: 40\text{cm (Raio 13);}$$

Aplicando os raios na equação da circunferência, obtém-se os resultados:

$$C_1: 87,92\text{cm (Circunferência 1);}$$

$$C_2: 100,48\text{cm (Circunferência 2);}$$

$$C_3: 113,04\text{cm (Circunferência 3);}$$

$$C_n = C_{13}: 251,20\text{cm (Circunferência 13).}$$

Com a subtração entre as circunferências sucessoras, é possível obter a razão de 12,56cm. Esse valor significa que a cada revolução, para um aumento no raio em 2 cm, a circunferência aumenta 12,56 cm.

Ao somar todas as circunferências resultaria em uma aproximação do tamanho necessário de mangueira para realização do projeto, essa soma é feita por meio da equação (40):

$$S_n = \frac{n(a_1 + a_n)}{2} \quad (40)$$

$$S_{13} = \frac{13(87,92 + 251,20)}{2} = 2204,28 \text{ cm}$$

O resultado representa aproximadamente 23 metros de mangueiras por espiral totalizando 46 metros totais, ou seja, seria necessário comprar uma bobine de 50 metros de mangueira para confeccionar o coletor térmico do projeto.

Com a definição do comprimento de mangueira, restava a seleção do termostato e da bomba circuladora, deixando os acessórios de ligação para serem comprados de acordo com as necessidades para o bom funcionamento do circuito hidráulico.

Foi escolhido com base no preço e funções, o termostato modelo XH-W3001, Figura 54.



Figura 54 - Termostato modelo XH-W3001

De igual modo, foi optado pela compra de uma bomba de água *standard* com 34 W, utilizada em lavadoras de roupa, essa escolha foi devido ao seu preço, baixo consumo energético e acessibilidade, Figura 55.



Figura 55 - Bomba hidráulica 34W da marca EMICOL

De forma a prever o consumo energético com os 34W de potência da bomba, será considerada utilizações de 3 minutos, tempo necessário para o termostato ligar a bomba enquanto circula a água quente. Essa ativação ocorrerá em média 5 vezes por hora entre as 10:00 horas da manhã até as 17:00 horas da tarde (tempo de exposição solar), ou seja, 105 minutos por dia ou 1,75 horas, que em um mês de 30 dias são 52,5 horas, isso resulta em 1785Wh. Com base no histórico de faturação, considerando os encargos de consumo e transmissão, o preço médio do kWh na Bahia foi de aproximadamente 0,16€ fazendo com que o consumo mensal dessa bomba seja de 0,29€.

Finalizando a pesquisa e estudo dos materiais primários, na Tabela 21 são apresentados os elementos que foram cotados e encomendados.

Tabela 21 - Custos de produtos encomendados para elaboração do projeto.

Produto	Valor
Mangueira	10,57€
Termostato	4,23€
Bomba	7,65€
Total	22,45€

Com o planeamento inicial feito, iniciou-se a fase de construção, primeiramente do suporte, onde foram reutilizados os pedaços de madeira do tipo maçaranduba. Também foram reaproveitadas algumas chapas de aço, retiradas de fogões, essas foram pintadas de preto para que houvesse uma maior absorção de calor, de modo que o coletor recebesse a radiação solar em conjunto com o calor da chapa de aço. Figura 56.



Figura 56 - Mosaico de fotos com a construção do suporte em madeira

A próxima etapa trata-se da fixação da mangueira no suporte, mas antes disso é necessário ainda planejar e prever as conexões entre elementos, para assim, posicioná-los da melhor forma. Assim, foi modelado o suporte juntamente com as espirais, para serem validadas diversas hipóteses antes da sua construção, evitando perda de tempo com retrabalho e desperdício de recursos, Figura 57.

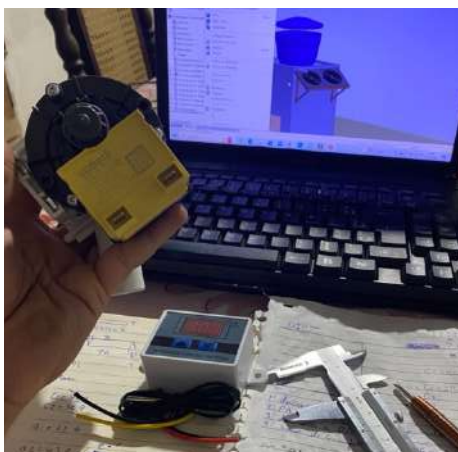


Figura 57 - Bomba hidráulica 34W da marca EMICOL

Inicialmente foi optado pelas entradas de água fria e saída de água quente, serem feitas pela tampa do reservatório, evitando furos irreversíveis em sua lateral. Essa ideia não avançou devido a complexidade em fixar tubagens ou manter uma mangueira sem dobras, de modo que fizesse a coleta e descarga de água em pontos diferentes.

Assim como o ar, a água quente por ser menos densa, tende a ficar na superfície, enquanto a água fria fica no ponto mais baixo. Assim, foi optado pela captação da água por meio de furos laterais feitos na mesma linha vertical, onde no furo mais baixo era captado água fria e no furo mais elevado, ocorria a descarga de água quente, Figura 58.

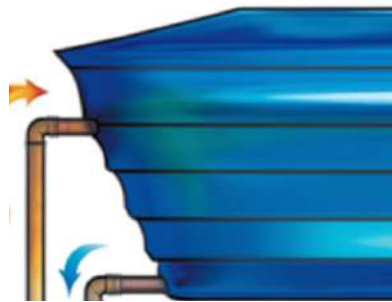


Figura 58 - Vista lateral do reservatório com a tubagem de água fria e quente.

Fonte: (Produzida por Inteligência Artificial, 2024)

Para irem de encontro com os furos do reservatório, as espirais precisariam começar e terminar no mesmo ponto, assim, os enrolamentos começam e terminam nos raios maiores, conforme Figura 59.

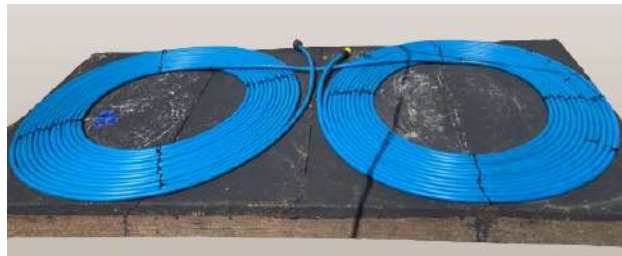


Figura 59 - Espirais de mangueira, modeladas com as condições calculadas.

Dando seguimento, todo o conjunto de captação foi pintado de preto fosco, para uma maior absorção da radiação solar, Figura 60 (a).

A próxima etapa foi a fixação da bomba circuladora, que ficou abaixo das chapas de aço, de modo que ficasse menos exposta às condições climáticas. De igual forma foi também fixado o termostato, Figura 60 (b). A bomba foi posicionada na entrada de água fria, para que não houvesse contacto com a água quente e provocasse um aquecimento anómalo, diminuindo sua vida útil, ao ser posicionada na entrada, a água fria ao entrar, expulsa toda água quente acumulada, que vai diretamente para o reservatório.

Antes de ser suspenso, o projeto foi antes simulado em solo, para verificar seu correto funcionamento e ajustes de parâmetros do termostato bem como a inspeção de qualquer vazamento entre conexões, Figura 60 (a).

A deslocação da água quente acumulada na espiral até o reservatório será feita pela própria mangueira de 1/2", sem conexões, enquanto a água fria chega até a bomba por meio de uma mangueira de 1", em seguida, a água fria parte para espiral.

De forma proposital, a mangueira que abastece o coletor, não foi pintada de modo que constantemente seja verificado o estado interno das mangueiras referente a proliferação de microalgas.

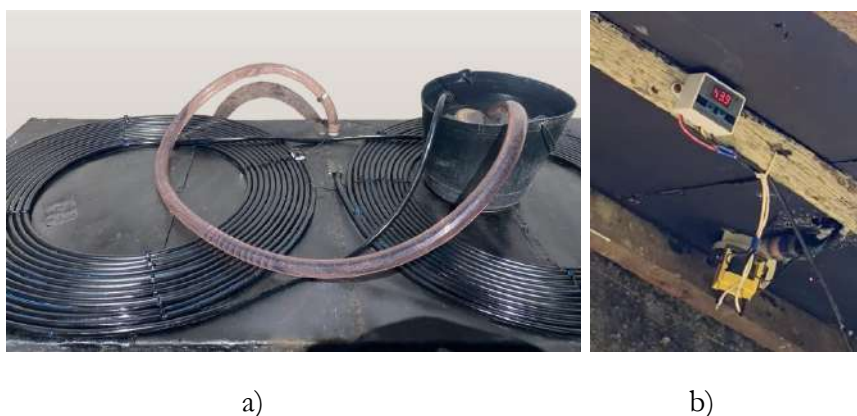


Figura 60 - Elementos do circuito hidráulico: a) Simulação de funcionamento antes da fixação na estrutura b) Fixação estratégica da bomba circuladora e termostato.

Na fase final da construção, dois ganchos de aço foram modelados em barra de aço 5 mm, de forma que encaixassem no suporte. Os ganchos foram fixados um em cada pilar da estrutura do reservatório, Figura 61 (b), e uma vez que a elevação dessa carga não seria fácil, sua fixação necessitava de meios simples e rápidos, a sustentação por ganchos foi o meio encontrado para isso, Figura 61 (a).



Figura 61 - Fixação do projeto a estrutura da caixa d'água: a) Conjunto preso aos ganchos; b) Gancho de aço preso ao pilar da estrutura.

Por fim, as ligações entre as mangueiras e a caixa d'água foram feitas por meio de flanges plásticas, próprias para esse fim, Figura 62 (a). Os modelos eram escolhidos com base no tipo de rosca que se ajustasse a conexão da própria mangueira, Figura 62 (b).

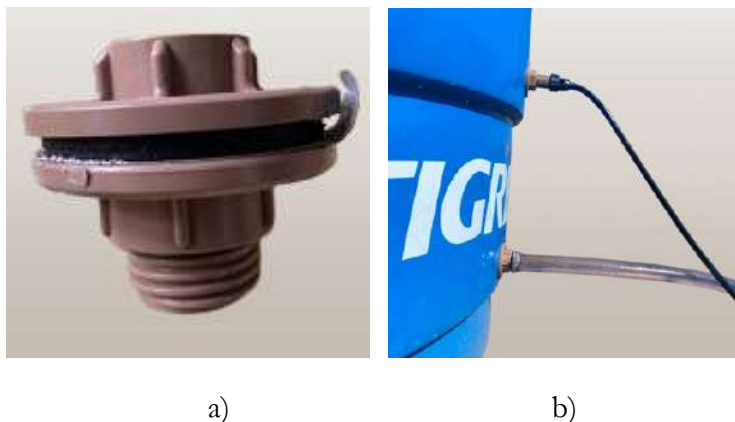


Figura 62 - Ligação do circuito hidráulico a caixa d'água: a) Flange para conexão de tubagens. b) Ligação das mangueiras as flanges.

O termostato foi parametrizado para acionar a bomba em 43°C, essa temperatura é obtida por meio de uma sonda posicionada no último enrolamento da saída de água quente, o que permite que a bomba seja desligada apenas quando toda a água quente seja removida do circuito hidráulico, assim, a água fria precisa chegar até o final do trajeto para que a sonda faça a leitura de redução na temperatura, interrompendo a circulação quando a sonda registra 42°C.

Para que não houvesse interferência da radiação solar na sonda, um pedaço de esferovite como isolante térmico, foi posto para cobrir o sensor, Figura 63.



Figura 63 - Sonda medidora de temperatura.

Como o reservatório já possuía uma instalação hidráulica própria, a captação de água para distribuição na casa era feita através do ponto mais baixo do reservatório, e assim garantia que em uma falta de água, houvesse água acumulada para o abastecimento. Esse ponto de captação que leva a água para os pontos de consumo precisou ser alterado por conta do posicionamento da água quente que por ser menos densa, ficar na parte superior, desse modo, para não fazer mais furos e alterar a instalação original, foi optado por adaptar uma mangueira a flange, que capta água,

Figura 64, nessa mangueira foi posto uma boia feita com uma garrafa plástica, e assim a captação é feita sempre na parte superior do reservatório.



Figura 64 - Mangueira para captação de água superficial.

Por ciclo de ativação da bomba, considerando os 50 metros de mangueira com 1/2" de diâmetro interno, o cálculo do volume de água quente produzido foi feito por meio da equação (41), volume do cilindro vazado, Figura 65.

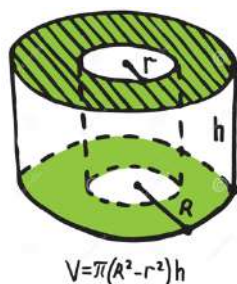


Figura 65 - Variáveis e equação para o cálculo de volume de um cilindro.

Fonte: (Dreamstime, 2024)

$$V = \pi(0 - 0,00585^2)50 \quad (41)$$

Para calcular o volume apenas do interior da mangueira que possui 5,85mm de raio interno, é anulado o raio externo, e todas as medidas são convertidas em metros para que o resultado seja apresentado em metros cúbicos.

Assim,  $V = 0,005372$  metros cúbicos, que representam 5,38 litros de água aquecida a 43°C.

A escolha dos 43°C como temperatura de acionamento foi baseada em testes empíricos, buscando uma maior eficiência para o aquecimento de água, inicialmente a temperatura havia sido programada em 55°C o que provocava poucos acionamentos, apenas nos horários de pico de temperatura, entre 11:00 – 14:30, Figura 66.

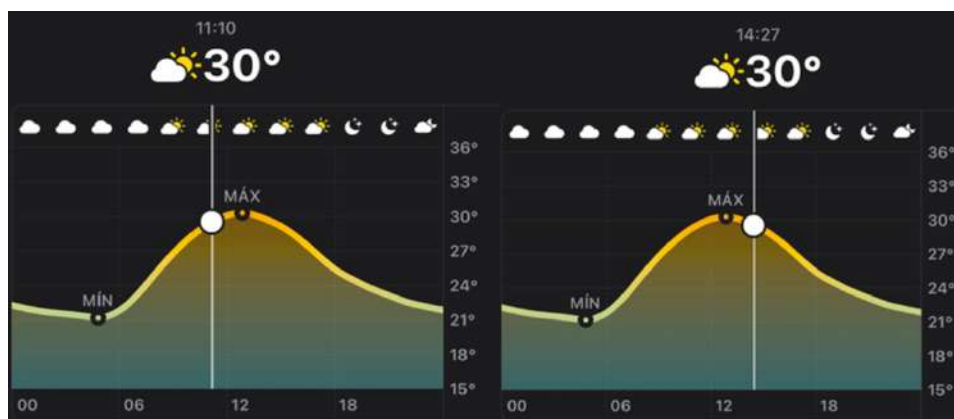


Figura 66 - Gráfico de incidência solar ao longo do dia.

Quando alcançados os 55°C e a água quente circulava, dando espaço para água fria, havia uma queda de temperatura na espiral para 26°C (Temperatura da água nos níveis mais baixos do reservatório), até alcançar novamente os 55°C levava aproximadamente 40 minutos, isso durante as horas de maior incidência solar, não se repetindo nos demais momentos do dia.

Com a redução para 45°C foi notado um aumento significativo na quantidade de acionamentos. Porém, 43°C foi a temperatura que proporcionou a maior quantidade de água quente produzida, com um acionamento médio a cada 15 minutos ao longo do dia.

A parede em que foi instalado o projeto, fica para o lado poente, assim, a incidência solar de modo que provoque acionamento da bomba com 43°C, começa por volta das 10:00 e vai até as 17:00.

Por meio de um gravador de voz, deixado próximo da bomba durante um dia ensolarado, foi verificado na gravação, através da amplitude de ruído, Figura 67, que o acionamento ocorreu 25 vezes, o que resultam em 134,5 litros de água aquecida a 43°C.

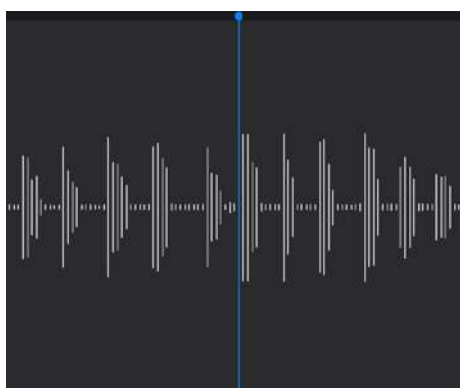


Figura 67 - Áudio gravado para detetar variações de ruído.

Quando regressa aquecida para o reservatório, a água da espiral ainda permuta calor com volume de água do depósito e ao fim, abastece a casa com a temperatura média de 32,3°C, o que representa 6 graus de diferença, Figura 68.



Figura 68 - Temperatura da água superficial no reservatório.

Ao final do dia quando não havia mais calor suficiente para acionar a bomba e alterar o volume de água quente acumulado, foi medido o tamanho da coluna de água quente no depósito, de forma a estimar a quantidade de litros. Colhendo várias amostras ao longo da profundidade, Figura 69, foram observadas as seguintes medições:

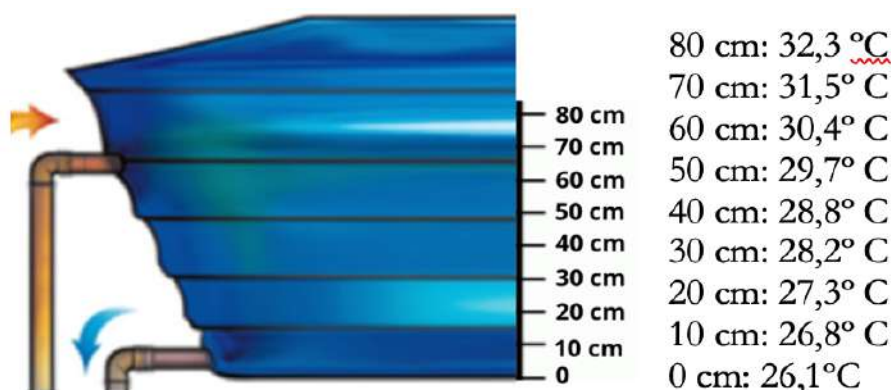


Figura 69 - Vista lateral do reservatório em cotas.

Fonte: (Produzida por inteligência artificial, 2024)

Considerando os primeiros 20 cm superficiais, onde a temperatura atingiu mais do que 30°C, por meio da equação (42) é possível calcular utilizando o volume de água quente disponível utilizando o diâmetro superior do reservatório (1,445 m).

$$V = \pi(0,722^2)0,3 \quad (42)$$

$$V = 0,327 \text{ m}^3$$

O que em litros são aproximadamente 327 litros de água quente.

Ao ser medido o caudal do chuveiro, verificou-se que em um minuto eram utilizados em média 4 litros de água, considerando que os banhos levam uma média 8 minutos, o gasto de água são 32 litros, o que torna o volume de água quente armazenada, suficiente para 10 banhos completos.

Entre o reservatório até os pontos de consumo, há um caminho de tubagens que passa por baixo da casa sem qualquer isolamento térmico, portanto existe uma perda de temperatura, fazendo com que a água chegue às toneiras por volta de 30°C, ou seja, perde-se 2°C pelo caminho. Conseguindo no final 4°C de diferença para os 26°C em temperatura ambiente.

Avaliando a mesma diferença de temperatura, quando a água vem da rede a 26°, o chuveiro elétrico apenas com a resistência é capaz de elevar a temperatura para 37,7°em média, sendo uma diferença de 11,7°, Figura 70.

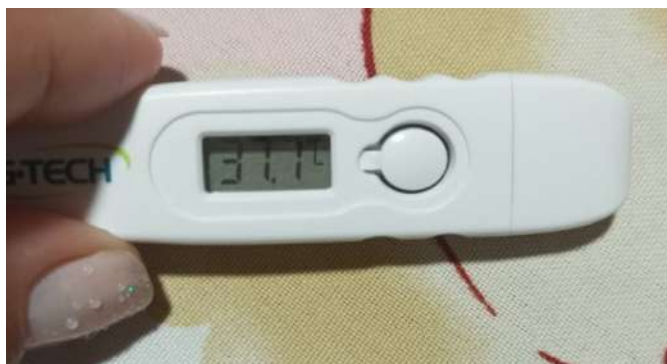


Figura 70 - Temperatura da água aquecida apenas pela resistência elétrica do chuveiro.

Com o auxílio do solar térmico, as águas que antes chegavam no chuveiro na faixa 26°C, passam para 30°C e com a resistência em conjunto, a temperatura chega até os 37,7°C em média, sendo preferível, por vezes, para um conforto térmico a alteração para o modo “verão”, quando o chuveiro tem a potência reduzida para não aquecer demasiado a água.

A temperatura final da água nos chuveiros elétricos, diferente dos termoacumuladores, pode variar consoante o caudal, onde um fluxo menor de água permuta calor com a resistência elétrica e absorve muito mais energia térmica que um fluxo de água maior. Assim, em dias frios para obter uma temperatura agradável, é necessário reduzir consideravelmente o caudal.

Com a instalação do solar térmico, a água passou a chegar morna ao ponto de consumo, em uma temperatura confortável, entretanto é previsto que as pessoas continuem a utilizar a resistência elétrica para obter nos dias mais frios, um conforto térmico maior, enquanto nos dias mais quentes é possível a redução de potência do chuveiro, o que traria também redução da fatura de eletricidade. Assim, a resistência elétrica deixa de ser um item obrigatório, e passa a um complemento quando se é desejado temperaturas mais elevadas, equilibrando a redução do consumo com o conforto térmico.

Finalizando a terceira etapa Check, e começando o ACT (agir), foram observadas as seguintes oportunidades de melhoria para elevar as temperaturas no depósito:

- Aumento da capacidade de fluxo: A substituição da mangueira atual por uma de maior diâmetro, com  $\frac{3}{4}$  de polegada, aumentaria a produção de água quente de 5,38 litros para 12,05 litros, o que representa um acréscimo de 6,674 litros.

Essa mudança mais que dobraria a capacidade de produção de água quente, sendo uma das melhorias mais eficazes.

- **Eliminação da pintura:** a utilização de uma mangueira já fabricada na cor preta eliminaria a necessidade de pintura, simplificando o processo de montagem e custos.
- **Captação mais eficiente:** colocar o ponto de captação do circuito hidráulico mais próximo da superfície aumentaria a eficiência do sistema, pois a água pré-aquecida reentraria no sistema para ser aquecida novamente. Isso reduziria o tempo necessário para atingir a temperatura de funcionamento, resultando em uma maior produção de água quente.
- **Cobertura:** a instalação de uma cobertura transparente sobre a mangueira impediria a permuta de calor com as correntes de ar, o que permitiria o alcance mais rápido da temperatura.
- **Isolamento térmico:** o isolamento térmico nas tubagens também ajudaria a manter a água quente por mais tempo, diminuindo as perdas térmicas.
- **Instalação de uma rede de tubagem apenas para água quente,** evitando que a mesma seja destinada a outros pontos de consumo se não o chuveiro.

Para garantir o funcionamento eficiente do sistema solar térmico, foram identificados os seguintes pontos de manutenção:

**Substituição da mangueira:** A presença de microrganismos, como algas, fungos e bactérias, podem deixar inadequa para banho a água aquecida. Portanto, é necessário substituir a mangueira regularmente. Ou como alternativa, considerar a adição de uma espiral interna na caixa d'água, que fecharia o circuito e evitaria o contato entre águas.

**Poda de árvores vizinhas:** Foi observada a necessidade recorrente de podar uma árvore vizinha para evitar que sua sombra interfira na irradiação solar. Essa atividade de manutenção é fundamental para garantir que os coletores solares recebam a exposição máxima ao sol e devem ser realizados anualmente.

A exposição contínua das chapas de aço a umidade e as variações de temperatura, tornam elas suscetíveis à oxidação. Por isso de forma semestral, é importante verificar e reparar com spray de zinco os pontos de corrosão que podem comprometer a durabilidade e a eficiência de todo o sistema.

## **4.2 Resultados e Discussões**

Para aplicação das equações, alguns valores serão assumidos de acordo a realidade.

O ciclo de vida expectável para esse projeto é de 5 anos. Esse período leva em conta a deterioração natural dos materiais sob exposição a condições climáticas, como

sol, chuva e variações de temperatura. Entretanto esse período pode ser estendido com a manutenção adequada e substituição de peças.

Os elementos sujeitos ao desgaste são nomeadamente:

- Bomba circuladora: a bomba é exposta ao desgaste contínuo sendo exposta à humidade e tendo partes móveis e mecânicas.
- Termostato: sendo um elemento eletrónico é sensível a variações de temperatura e humidade.
- Mangueiras plásticas: plásticos tendem a ressecar com a exposição prolongada ao sol o que levaria a rachaduras e vazamentos, além da proliferação de microalgas já que não se poderia fazer a limpeza interna da mangueira.
- Chapas metálicas: mesmo com tratamento anticorrosivo, as chapas estão sujeitas à oxidação e degradação, especialmente em ambientes húmidos.

Apesar do ciclo de vida ser 5 anos, é expectável com a manutenção adequada, que o ativo estenda sua atividade por 10 anos, quando os custos de manutenção ficam superiores a aquisição de um novo ativo mais eficiente.

Nesse período, na Tabela 22, foram admitidas as seguintes atividades de manutenção:

Tabela 22 - Registro das atividades de manutenção previstas em 10 anos.

Ano	Atividade de manutenção	Custo (€)
1	Não realizado	0
2	Reparação da Bomba	2,35
3	Reparação da chapa de aço	1,57
4	Substituição da Bomba	9,43
5	Substituição do Termostato	4,71
6	Substituição da chapa de aço	3,93
7	Não realizado	0
8	Substituição da mangueira/coletor	11,79
9	Reparação da Chapa de aço	1,88
10	Não realizado	0
Total		35,66

Além dos custos com manutenção, existem também os custos operacionais que nesse projeto, foram calculados a partir do tempo de atuação da bomba, conforme já apresentado, esses custos ficaram em 0,28€ mensais ou 3,39€ ao ano.

Aplicando esse valor na equação (1) para descobrir o valor futuro nos próximos 10 anos, e utilizando como taxa a inflação mais recente (4,42%), referente a agosto de 2023 até setembro de 2024 (Investidor10, 2024).

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Tabela 23 - Cálculo dos custos operacionais nos próximos 10 anos.

Ano	Valor presente (€)	Valor Futuro (€)
1	3,39	3,54
2	3,39	3,69
3	3,39	3,84
4	3,39	4,00
5	3,39	4,17
6	3,39	4,35
7	3,39	4,53
8	3,39	4,73
9	3,39	4,92
10	3,39	5,13

As aplicações dos modelos de avaliação do ciclo de vida envolvem o cálculo da taxa aparente, definida pela equação de Fisher, eq. (5):

$$(1 + i_A) = (1 + r) \times (1 + h) \times (1 + P) \times (1 + R) \quad (5)$$

Com base no cenário brasileiro em novembro de 2024, os valores são:

- $r$  : Taxa de Juros Real - 11,25% (Godoy, 2024).
- $h$  : Taxa de Inflação - 4,42% (Investidor10, 2024).
- $P$ : Taxa de Lucro – Para um investimento do tipo conservador, em energia solar, será assumida uma taxa média de 4% ao ano.
- $R$ : Taxa de Risco – Para investimentos em projetos de energia renovável, o risco pode ser considerado moderado, então será assumido 2% ao ano

Assim:

$$(1 + i_A) = (1 + 0,1125) \times (1 + 0,0442) \times (1 + 0,04) \times (1 + 0,02)$$

$$i_A: \text{Taxa Aparente} = 23,23\%$$

#### 4.2.2 Uniform Annual Income (UAI)

Conforme já apresentado na equação 6, matematicamente o modelo de ciclo de vida UAI é:

$$UAI_N = \frac{iA(1+iA)^n}{(1+iA)^n - 1} \times PNV_n \quad (6)$$

Na qual o  $PNV_n$  (Valor Presente Líquido) é dado pela equação (7):

$$PNV_n = II + \sum_{j=0}^n \frac{CM_j + CO_j}{(1 + i_A)^j} - \frac{V_n}{(1 + i_A)^n} \quad (7)$$

Onde:

II : Investimento Inicial = 22,45€

CM<sub>j</sub>: Custo de Manutenção = 0+2,35+1,57+9,43+4,71+3,93+0+11,79+1,88+0

CO<sub>j</sub>: Custo de operação = 3,54+3,69+3,84+4,00+4,17+4,35+4,73+4,92+5,13

i<sub>A</sub>: Taxa Aparente = 23,23%

V<sub>n</sub> : Valor do equipamento após um período de 10 anos = 47,16€

Houve valorização do ativo com a substituição e otimização das peças, por exemplo a mangueira que foi substituída por um modelo mais expresso, e que por consequência acumulava mais água quente.

O que resulta em um:

$$PNV_{10} = 50,71€$$

$$UAI_{10} = 13,44€$$

Como o Valor Presente Líquido 50,71€, é superior ao investimento inicial 22,45€, isso significa que o projeto é financeiramente viável e pode ser considerado lucrativo. Mesmo que depois de 10 anos, com a depreciação do ativo a uma taxa de 23,23% ao ano e ainda com o aumento dos custos de manutenção acumulados, ao final da vida útil, o ativo vale mais do que o investimento inicial.

A UAI, diz o quanto esse ativo precisa gerar anualmente de forma constante ao longo dos 10 anos de operação, considerando a depreciação do ativo com a taxa aparente e os custos de manutenção, ou seja 13,44€.

Ao multiplicar 13,44€ pelos 10 anos, o valor é diferente dos 50,71€ calculados, entretanto, por conta da taxa de desconto os 13,44€ que são constantes perdem valor ao longo do tempo de modo que ao fim de 10 anos, equivalem ao valor presente do ativo.

O solar térmico instalado é capaz de produzir 327 litros de água quente em um dia. Para produzir a mesma quantidade de água quente, o chuveiro iria gastar assumindo os mesmos 4 litros por minuto, por volta de 82 minutos ou 1,36 horas. Para um chuveiro de 4000W isso representa 5450Wh ou 5,45kWh, conforme já citado, o preço médio do kWh na Bahia é de 0,16€, assim, o chuveiro elétrico consome 0,86€ ao dia, 25,70€ ao mês e 308,49€ ao ano. Seriam esses os valores que se deixaria de pagar, em caso ideal onde a produção de água quente é inteiramente do solar térmico sem utilização da resistência elétrica.

Ao comparar o rendimento mínimo necessário, ou seja, o valor cálculo do UAI (13,44€), com o rendimento máximo alcançado no solar térmico (308,49€) anuais, situação ideal de abandono da resistência elétrica. Obtém-se um alto índice de lucratividade 2.295,31%, representando a percentagem de lucro capaz de produzir em comparação ao valor mínimo necessário.

#### 4.2.3 Minimization of Total Average Cost Method (MTAC)

Esse método ajuda a identificar quando o custo de manter o ativo torna-se mais elevado do que o custo de substituir o ativo, com base em vários fatores, incluindo a depreciação, os custos operacionais, os custos de manutenção.

Aplicando as condições já estabelecidas na equação do MTAC, equação (10):

$$CMT = \frac{1}{n} \left( II - \frac{V_n}{(1+i_A)^n} + \sum_{j=1}^n \frac{CM_j + CO_j}{(1+i_A)^j} \right) \quad (10)$$

Onde:

$II$ : o investimento inicial = 22,45€.

$V_n$ : Valor do equipamento após um período de 10 anos = 47,16€

$i_A$ : Taxa Aparente = 23,23%

$CM_j$ : Custo de Manutenção = 0+2,35+1,57+9,43+4,71+3,93+0+11,79+1,88+0

$CO_j$ : Custo de operação = 3,54+3,69+3,84+4,00+4,17+4,35+4,73+4,92+5,13

$n$ : Número de anos = 10.

Com o cálculo é obtido o Custo Médio Total de 4,72€ por ano, no período de 10 anos.

Esse valor serve como referência pois caso, em algum momento, o custo de manter e operar o ativo ultrapasse esse valor, pode ser mais vantajoso substituí-lo.

É estimado que o ativo prolongue sua vida útil de 5 anos para 10 anos, entretanto ao analisar a Tabela 24, de custo médio total acumulado por ano, é possível verificar o melhor momento de uma possível substituição.

No começo, os custos de manutenção e operação são baixos, isso faz com que o valor residual cubra esses gastos incluindo o de aquisição, já que não há entrada financeira, pois a equação analisa apenas os gastos, então, nesse caso os valores negativos representam que não há custos.

Com o passar dos anos, os custos de manutenção e operação aumentam gradualmente. Esses custos são somados ao longo do tempo, e conforme se acumulam, demonstram a previsão de gastos com o ativo naquele período, de modo que para o ano 10 no fim de vida, representa 4,72€.

Tabela 24 - Cálculo anual do MTAC.

Ano	Custo de manutenção (€)	Custos Operacionais (€)	MTAC Acumulado (€)
1	0,00	3,54	-10,91
2	2,35	3,69	-0,11
3	1,57	3,84	4,24
4	9,43	4,00	5,31
5	4,71	4,17	5,65
6	3,93	4,35	5,62
7	0,00	4,53	5,33
8	11,79	4,73	5,31
9	1,88	4,92	5,02
10	0,00	5,13	4,72

Na teoria, quando descoberto o menor custo, aquele é o momento de substituir o ativo, e apesar de parecer contraditório, essa situação é recomendada quando os custos voltam a subir ou os benefícios de manter o ativo são inferiores aos benefícios de investir em um novo. Sendo necessário analisar outros indicadores, uma vez que o MTAC não verifica o retorno financeiro, apenas os custos.

#### 4.2.4 Life Cycle Investment (LCI)

Nesse caso, será analisado o desempenho financeiro do solar térmico ao longo dos 10 anos, considerando todos os custos e retornos financeiros. Anteriormente ao fazer uma análise financeira considerando uma situação ideal onde deixa-se de utilizar completamente a resistência elétrica para utilização apenas da água quente produzida no solar térmico, o valor economizado anualmente com as faturas de eletricidade é de 308,49€

Para uma análise concreta do retorno financeiro serão assumidas situações reais onde o uso do chuveiro elétrico não é eliminado pois os moradores optaram por um conforto térmico maior e uma redução de custos menor, assim, será assumido um cenário pessimista em que a utilização da resistência elétrica foi reduzida apenas em  $\frac{1}{10}$  da utilização habitual.

Ou seja, o retorno financeiro passa a 30,85€ anuais. Considerando ainda o aumento da tarifa de energia por conta da inflação (4,42%), o retorno financeiro acompanha esse aumento, uma vez que é medido pelo kW não consumido. A Tabela 25 considera os custos de manutenção, operacionais e o retorno ao longo dos 10 anos, sob influência da inflação.

Tabela 25 - Cálculo anual dos custos de manutenção, operacionais e retorno financeiro.

Ano	Custo de Aquisição (€)	Custo de Manutenção (€)	Custos Operacional Anual (€)	Retorno Financeiro Anual (€)
0	22,45	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	3,54	32,21 €
2	0,00	2,35	3,69	33,64 €
3	0,00	1,57	3,84	35,12 €
4	0,00	9,43	4,00	36,68 €
5	0,00	4,71	4,17	38,30 €
6	0,00	3,93	4,35	39,99 €
7	0,00	0,00	4,53	41,76 €
8	0,00	11,79	4,73	43,60 €
9	0,00	1,88	4,92	45,53 €
10	0,00	0,00	5,13	47,54 €
Total	22,45	35,69	42,93	394,38 €

Aplicando os valores acumulados na equação (10), Retorno sobre o Investimento tem-se:

$$ROI = \left( \frac{394,38 - (35,69 + 42,93 + 22,45)}{35,69 + 42,93 + 22,45} \right) \times 100 \quad (10)$$

$$ROI = 290,20\%$$

Esse ROI extremamente alto significa que mesmo considerando um cenário pessimista em relação ao retorno financeiro (apenas  $\frac{1}{10}$  do ideal) os custos de aquisição, operação e manutenção são baixos de tal forma que o ativo torna-se extremamente rentável financeiramente, e ainda proporciona um melhor conforto térmico.

Através de uma tabela com o ROI Acumulado de cada ano é possível verificar na Tabela 26, que desde o primeiro ano o ativo sempre foi rentável, alcançando o *payback* no primeiro ano e mantendo-se rentável até o último ano. Situação ilustrada através do Gráfico 8.

Tabela 26 - ROI anual acumulado.

Ano	Custo Total Acumulado (€)	Retorno Financeiro Acumulado (€)	ROI Acumulado (%)
1	25,99	32,21 €	23,95%
2	32,03	65,85 €	105,59%
3	37,44	100,98 €	169,70%
4	50,87	137,65 €	170,60%
5	59,75	175,95 €	194,48%
6	68,03	215,94 €	217,42%
7	72,56	257,70 €	255,15%
8	89,08	301,30 €	238,24%
9	95,88	346,83 €	261,74%
10	101,01	394,38 €	290,43%

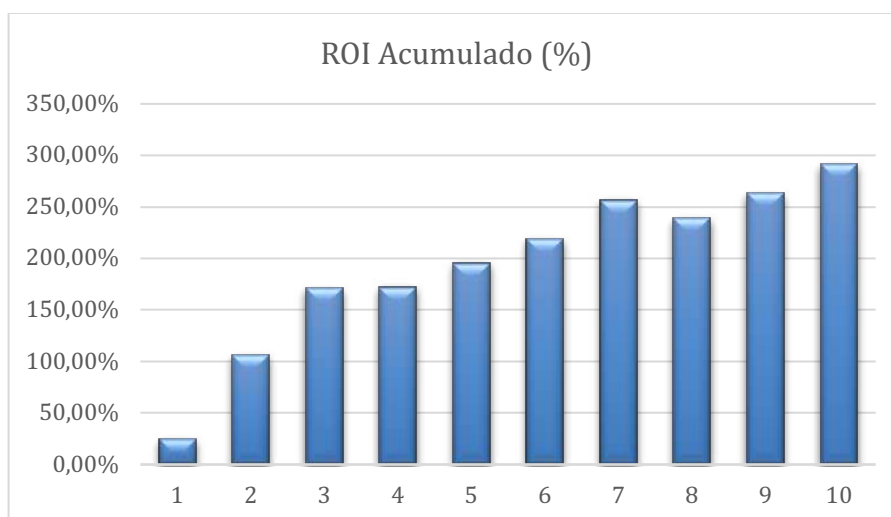


Gráfico 8 - ROI anual acumulado.

#### 4.2.5 Life Cycle of Physical Assets with Recovery (LCR)

O conceito de (LCR) foi aplicado durante a concepção do projeto, buscando a utilização e reutilização de materiais para a construção e futura manutenção do ativo, o que fará com que duplique o tempo de vida útil. Aproveitar a reutilização de elementos para construção desse protótipo proporcionou além de uma alta rentabilidade, promoveu também o desenvolvimento sustentável alinhado com as demandas atuais por práticas mais responsáveis e eficientes.

#### 4.2.6 Indicadores de Desempenho da Manutenção

Para aplicação dos Indicadores de Desempenho na Manutenção, novas considerações foram assumidas com base na descrição do projeto e aplicando situações reais

O território brasileiro, segundo TERRA NETWORKS BRASIL (2019) recebe mais de 2.200 horas de sol anuais. Será esse o tempo de trabalho considerado, uma vez que nos dias chuvosos o sistema não arranca.

As atividades de manutenção já foram previstas anteriormente e o tempo de serviço atribuído com base na complexidade das atividades, Tabela 27.

Tabela 27 - Tempo de operação do ativo e tempo de execução de manutenção.

Ano	Horas de Trabalho Por Ano	Atividade de Manutenção	Tempo de Manutenção Acumulado (H)	Nº de Manutenções Acumulado
1	2200			
2	4400	Reparação da Bomba (8h)	8	1
3	6600	Reparação da chapa de aço (2h)	10	2
4	8800	Substituição da Bomba (4h)	14	3
5	11000	Substituição do Termostato (1h)	15	4
6	13200	Substituição da chapa de aço (3h)	18	5
7	15400		18	5
8	17600	Substituição da mangueira (24h)	42	6
9	19800	Reparação da Chapa de aço (2h)	44	7
10	22000		44	7

Com os dados apresentados, a Tabela 28 foi elaborada na qual o MTBF - Tempo Médio Entre Falhas e o MTTR - Tempo Médio Para Reparação, foram calculados:

Tabela 28 - Cálculo anual do MTBF e MTTR acumulados.

Ano	MTBF Acumulado	MTTR Acumulado
1		
2	4400,0	8,00
3	3300,0	5,00
4	2933,3	4,67
5	2750,0	3,75
6	2640,0	3,60
7	3080,0	3,60
8	2933,3	7,00
9	2828,6	6,29
10	3142,9	6,29

Para uma visualização dos números em outra perspectiva, os gráficos para ambos os indicadores foram elaborados com linhas de tendência.

O MTBF, Gráfico 9, representa o tempo entre falhas, através da linha de tendência decrescente indica que o tempo está a diminuir, ou seja, entre o mesmo espaço de tempo, existe uma tendência de haver mais falhas, o que é expectável para um ativo que caminha para o fim de sua vida útil.

Através dos valores de MTBF é possível também estipular o tempo correto de manutenção preventiva, que nesse caso considerando um MTBF na metade do ciclo de vida, ano 5, seria de 2750,0 horas ou 229 dias aproximadamente, assumindo 12 horas de sol por dia, 7,6 meses, o que pode ser aproximado para manutenções semestrais, antes de cada verão e inverno, onde as temperaturas são variadas.

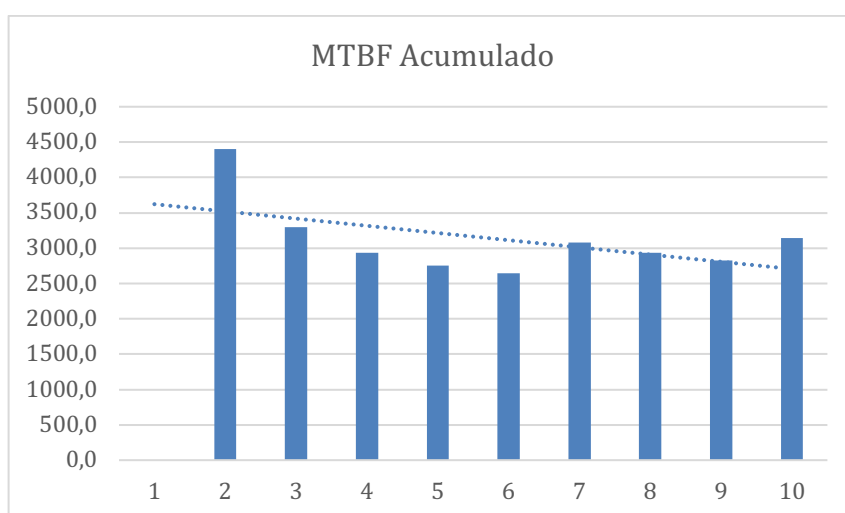


Gráfico 9 - MTBF Acumulado.

Para o MTTR, o Gráfico 10, indica que existe uma tendência linear no tempo entre falhas de 5 à 6 horas, o que para esse projeto considerando que opera apenas nos

horários de sol, a manutenção pode ser feita durante a noite sem que haja interrupção no seu funcionamento.

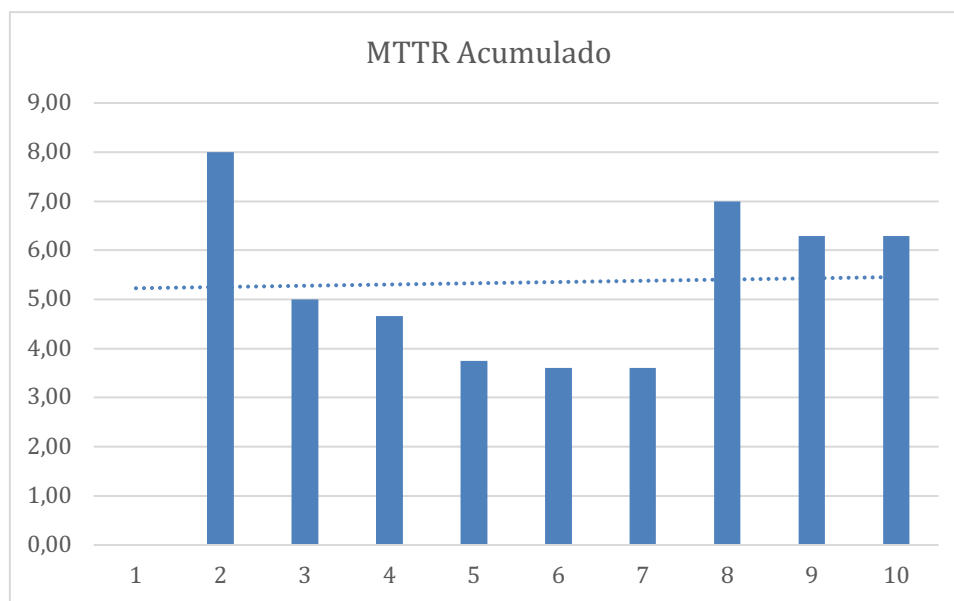


Gráfico 10 - MTBF Acumulado.

O **MTTF** - Tempo Médio Para Falhar, não foi aplicado nesse caso sendo usualmente aplicado em ativos sem reparação.

A **Disponibilidade Física das Máquinas**, é calculada por meio da equação (25):

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (25)$$

Aplicando o resultado do ano 10, onde refere-se a todo o cenário previsto do ciclo de vida. A Disponibilidade calculada é:

$$Disponibilidade = \frac{3142,9}{3142,9 + 6,29} \times 100 = 99,80\%$$

O que significa que o ativo estará disponível para operação na grande maioria dos casos, sendo o resultado um valor ótimo em comparação com padrões globais

O Custo de Manutenção por Faturação – CMF, foi calculado com o intermédio da Tabela 25, onde são apresentados os fluxos de caixas com custos e retornos, para obter no final o resultado total acumulado para aplicar na equação (27).

$$CMF = \frac{Custo\ total\ de\ manutenção}{Faturamento\ bruto} \quad (27)$$

$$CMF = \frac{35,69}{394,38} \cong 9\%$$

Esse valor representa que ao final da vida útil, dos 394,38€ obtidos como retorno financeiro, foi preciso investir apenas 9% desse valor em manutenção.

O Custo de Manutenção por Valor de Reposição – CMVR, de igual forma foi calculado na equação (29), utilizando os valores da tabela 25, sendo aplicado para o custo de aquisição a uma atualização de valor futuro de 10 anos com inflação de 4,42%, o que resultou no aumento de 22,45€ para 34,59€.

$$CMVR = \frac{\text{Custo Total de Manutenção}}{\text{Custo de aquisição do novo ativo}} \quad (29)$$

$$CMVR = \frac{35,69}{34,59} = 103,18\%$$

Esse valor indica que os gastos com a manutenção superam a aquisição de um novo ativo, o que faz sentido uma vez que ele chegou ao fim da vida útil.

Em um contexto geral esse seria um valor inaceitável uma vez que o máximo aceitável seria por volta de 6%, entretanto para uma tomada de decisão em substituir um ativo, é preciso olhar um contexto de modo geral, sendo necessário comparar os modelos de ciclo de vida e políticas de manutenção.

Mesmo com o valor da manutenção próximo ao custo de aquisição, os rendimentos financeiros justificam permanecer com o ativo que não deixa de ser rentável e apresenta um ROI crescente, uma vez que o retorno é bem maior que o lucro.

Do ponto de vista da análise LCR, os custos com manutenção permitem que o ativo continue a operar com a mesma eficiência e de forma rentável, sendo nesse caso ao substituir os elementos do projeto, trata-se de forma equivalente a estar construindo um novo, sendo possível a cada intervenção, realizar melhorias que aumentem a sua eficiência.

## **5 CONCLUSÃO**

Ao longo deste estudo, foi explorado o impacto das transformações energéticas na história da humanidade, desde as primeiras revoluções industriais até os desafios atuais da transição energética. A análise inicial destacou como a evolução das fontes de energia desde o vapor até a eletrificação, moldaram o desenvolvimento social no sentido de mitigar os impactos das mudanças climáticas, evidenciando a necessidade de fontes renováveis para uma demanda energética que está sempre a crescer.

Nesse contexto, o trabalho abordou o papel das energias renováveis, com destaque para a energia solar, acessível ao consumidor, como uma ferramenta essencial para a descarbonização e a democratização do acesso à energia. Enfatizando a importância de uma abordagem integrada envolvendo o ciclo de vida e políticas de manutenção, capazes de oferecer uma visão abrangente do desempenho e da durabilidade dos sistemas energéticos.

A partir dessa base teórica, o estudo concentrou-se no desenvolvimento de um modelo de baixo custo e manutenção simplificada, voltado para a produção de água quente em residências, sendo ainda possível associá-lo ao uso de chuveiros elétricos, proporcionando ainda maior conforto térmico sem a necessidade de grandes intervenções na infraestrutura da habitação. Demonstrando como decisões fundamentadas nessas perspectivas podem otimizar custos, ampliar a eficiência e viabilizar soluções acessíveis para enfrentar os desafios locais e globais do consumo energético.

A análise realizada no presente estudo demonstrou que a avaliação do ciclo de vida, em conjunto com políticas de manutenção, quando trabalhadas de forma integrada, oferecem uma visão mais abrangente sobre o desempenho e a durabilidade do sistema, permitindo uma gestão eficiente dos recursos e otimização dos custos ao longo de sua operação. De forma isolada, tanto o ciclo de vida quanto as políticas de manutenção possuem limitações de modo que a tomada de decisões com base em indicadores deve ser feita abrangendo diversos cenários. O estudo reforça que não é possível eleger uma abordagem como superior, pois ambas são complementares e permitem uma visão holística da situação.

Este trabalho incentiva o avanço das tecnologias sustentáveis ao apresentar uma base para o desenvolvimento de soluções energéticas que priorizam a eficiência, acessibilidade e a sustentabilidade, fatores essenciais para enfrentar os desafios ambientais da atualidade

Os resultados obtidos indicam que os sistemas solares térmicos podem ser uma alternativa prática e econômica para a transição energética, beneficiando tanto o consumidor quanto a economia local. Em um cenário pessimista representando apenas 1/10 do valor esperado, os indicadores de desempenho confirmam que o projeto não é apenas viável, mas também promissor como um modelo de negócio,

com a possibilidade de oferecer retornos maiores ainda por meio de otimizações futuras.

Este trabalho destaca, portanto, o papel de cada indivíduo na construção de um futuro mais sustentável, ao demonstrar que soluções renováveis são acessíveis e podem contribuir significativamente para um consumo mais consciente e eficiente.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGD. (2023). *Geração própria de energia elétrica atinge 20 GW e impulsiona o Brasil no ranking mundial de energia solar*. <https://tinyurl.com/55w4zbbk>
- Academia ADENE. (2024). *Técnico responsável pela instalação e manutenção de sistemas técnicos (TRM)*. <https://tinyurl.com/yaseur9j>
- Alonso, J. (2024). *Funcionamiento de las placas solares*. <https://tinyurl.com/2kbbccn3>
- Ameur, H. Ben, Han, X., Liu, Z., & Peillex, J. (2022). When did global warming start? A new baseline for carbon budgeting. *Economic Modelling*, 116, 106005. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.106005>
- APMI. (2024). *Requisitos para a Qualificação de Prestadores de Manutenção segundo a NP 4492:2023*. <https://tinyurl.com/5h9rf2h6>
- Ballor, G. (2022). CE Marking, Business, and European Market Integration. *Business History Review*, 77–108. <https://doi.org/10.1017/S0007680521000696>
- Banco de Portugal. (2024). *Boletim Económico — junho 2024*. <https://tinyurl.com/2vakbcak>
- BCSD Portugal. (2022). *Objetivo 7 Garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos*. <https://ods.pt/objectivos/7-energias-renovaveis/>
- Bermann, C. (2022). A energia que vem dos mares. *Jornal Da USP*. <https://jornal.usp.br/artigos/a-energia-que-vem-dos-mares/>
- Bosch Termotecnologia. (2024). *Painéis Solares Térmicos: Sistema Circulação Forçada*. <https://tinyurl.com/4y7mekrc>
- Caleffi. (2023). As instalações com bomba de calor ar-água. *Hidráulica*. <https://tinyurl.com/yc3nknk>
- Cambio Energético. (2024). *¿Cómo afectan los días nublados a las placas solares?* <https://tinyurl.com/yc2z6h52>
- Caneppele, F. (2021). Série Energia: Chuveiro elétrico foi criado por brasileiro e se popularizou nos anos 1930. *Jornal Da USP*. <https://tinyurl.com/yvzzmrnk>
- Carvalho, L. (2014). Os diferentes sistemas de solar térmico. *Renováveis Magazine*, 20. [https://www.renovaveismagazine.pt/do/download\\_RM20.html](https://www.renovaveismagazine.pt/do/download_RM20.html)
- Chicon, A. (2023). *El Parque Eólico de Gansu: Un Gigante de la Energía Renovable en China*. <https://tinyurl.com/yhvncnh4>
- Chris, R. (2019). The Paris Agreement—Implications for greenhouse gas removal and zero emissions energy production. In *Managing Global Warming* (pp. 17–66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00002-8>
- Colonial Piscinas. (2023). *Aquecedores*. <https://tinyurl.com/76c2araj>
- Custódio, J. (2020). A Era da Energia a Vapor em Portugal o caso agrícola. *Al-Madan Online*, 107–128. <https://tinyurl.com/mu3h2wz8>
- Dreamstime. (2024). *Volume do corpo do cilindro Ilustração vetorial do Doodle*. <https://tinyurl.com/45xypded>
- Duarte, R. (2018). *DEFINIÇÃO DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE ATIVOS: UM CASO DE ESTUDO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL* [Universidade do Porto]. <https://tinyurl.com/mvwdsayv>

- Ebazar. (2024). *Coletor Placa De Aquecimento Solar Para Piscina Girassol G1*. <https://tinyurl.com/bdesvxnr>
- Ebrahimi, M. (2023a). Introduction to power generation. *Power Generation Technologies*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95370-2.00005-3>
- Ebrahimi, M. (2023b). Energy sources for power generation. In *Power Generation Technologies* (pp. 71–98). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95370-2.00002-8>
- ecofener. (2023). *¿Qué tipos de sistemas solares térmicos existen?* <https://tinyurl.com/2ucu3v4u>
- EDP Comercial. (2023). *Energias renováveis: qual a sua importância?* <https://tinyurl.com/cydxaets>
- Ember and Energy Institute. (2024). *Geração de eletricidade a partir de energia hidrelétrica*. <https://tinyurl.com/yh3uuj2p>
- Enerbras. (2023). *Chuveiro elétrico ou a gás: economia de água e energia limpa*. <https://tinyurl.com/6bjmt27m>
- ENERGÊS. (2020). *O que é Importante Saber sobre Energias Renováveis*. <https://tinyurl.com/mr2hejfa>
- Erenoğlu, A. K., Erdinç, O., & Taşçikaraoğlu, A. (2019). History of Electricity. *Pathways to a Smarter Power System*, 1–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102592-5.00001-6>
- Eurofins Environment Testing Spain. (2024). *¿Qué es la norma ISO 14001 y para qué sirve?* <https://tinyurl.com/yz8yytz8>
- Farinha, J. M., Galar, D., Fonseca, I., & Kumar, U. (2013, May 24). Certification of maintenance providers: a competitive advantage. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 144–156. <https://doi.org/10.1108/13552511311315959>
- Farinha, J. T., Raposo, H. D. N., de-Almeida-e-Pais, J. E., & Mendes, M. (2023). Physical Asset Life Cycle Evaluation Models—A Comparative Analysis towards Sustainability. *Sustainability*, 15(22), 15754. <https://doi.org/10.3390/su152215754>
- Fecha, J. (2012). *Aplicação da PAS 55 ao Departamento de Operação e Manutenção da Operadora da Rede Elétrica de Distribuição* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://tinyurl.com/2t39xerk>
- Ferreira, M. (2020). *Avaliação do Potencial de Produção de Biogás e Energia a partir de Resíduos Agrícolas no Paraná* [Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. <https://tinyurl.com/mrt4ujbu>
- Figueiredo, N. (2021). *Implementação de Sistema de Gestão da Manutenção em Equipamentos e Instalações Técnicas* [Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu]. <https://tinyurl.com/9d5t7p2m>
- Garcia, D. (2019). *Geração de Energia Maremotriz - Panorama mundial e nacional* [Escola de Engenharia de São Carlos ]. <https://tinyurl.com/mu9w3b4p>
- Garrido, J. (2023). *Manutenção Preventiva e Otimização de um CMMS numa Indústria Alimentar* [Relatório de Estágio de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra]. <https://tinyurl.com/5dvber2n>
- Global Solar Atlas. (2024). *Irradiação Horizontal Global*. <https://tinyurl.com/3ppmpd2r>
- Godoy, D. (2024). *Entenda por que o BC intensificou alta dos juros e seu efeito na economia*. <https://tinyurl.com/43nfsbt>
- Goldenergy. (2021a). *7 tipos de energia renovável (e as 5 que utilizamos em Portugal)*. <https://tinyurl.com/2j7yrr4b>

- Goldenergy. (2021b). *Tabela de consumo de energia dos eletrodomésticos: guia essencial*. <https://tinyurl.com/2z6zm2tu>
- Goldenergy. (2024a). *Desenvolvimento Sustentável*. <https://tinyurl.com/z4x39nyb>
- Goldenergy. (2024b). *Protocolo de Quioto*. <https://tinyurl.com/ycxyu5nt>
- GT Agenda 2030. (n.d.). *O QUE É A AGENDA 2030 | WHAT IS THE 2030 AGENDA*. Retrieved May 21, 2024, from <https://gtagenda2030.org.br/agenda-pos-2015/>
- H.C. White Co. (1906). *Thomas Edison and his original dynamo, Edison Works, Orange, N.J., U.S.A.* <https://www.loc.gov/item/93510144/>
- Iberdrola. (2023). *Construiremos três parques eólicos na Alemanha com capacidade de até 200 MW*. <https://tinyurl.com/4e4czzku>
- Iberdrola. (2024). *Operação de energia solar fotovoltaica*. <https://tinyurl.com/2w69bvax>
- Idhammar, T. (2020). *Maintenance Cost and Estimated Replacement Value*. <https://tinyurl.com/6am3r4sp>
- International Energy Agency. (2021). *Hydropower Special Market Report Analysis and forecast to 2030*. <https://tinyurl.com/muju6b5u>
- International Energy Agency. (2023a). *Electricity consumption, World, 1990-2022*. <https://tinyurl.com/57kkhzde>
- International Energy Agency. (2023b). *Renewable electricity generation by source (non-combustible), World, 1990-2022*. <https://tinyurl.com/4dxyad2f>
- International Energy Agency. (2023c). *Total energy supply (TES) by source, World, 1990-2022*. <https://tinyurl.com/4ev68u2s>
- Investidor10. (2024). *Qual o IPCA hoje?* <https://tinyurl.com/2bjdjyse>
- IPAC. (2022). *Regulamento Geral de Acreditação*. <https://tinyurl.com/2uf62sm8>
- ISO. (2024). *Sobre a ISO*. <https://www.iso.org/about>
- Kara, S., & Hauschild, M. Z. (2024). Life Cycle Engineering as a Pathway to Achieving Net-zero Targets. *Procedia CIRP*, 122, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.003>
- Keepfy. (2022). *8 indicadores de manutenção fundamentais + como calcular*. <https://tinyurl.com/32nxrzuk>
- Lamarão, S. (2012, January). A ENERGIA ELÉTRICA E O PARQUE INDUSTRIAL CARIOCA (1880-1920). *Simposio Internacional Globalización, Innovación y Construcción de Redes Técnicas Urbanas En América y Europa, 1890-1930*. [https://www.ub.edu/geocrit/Simposio/cLamarao\\_Aenergia.pdf](https://www.ub.edu/geocrit/Simposio/cLamarao_Aenergia.pdf)
- Leitão, J. (2014). *Estudo do Potencial de Aproveitamento de Energia Geotérmica em Portugal Continental* [Universidade de Coimbra]. <https://tinyurl.com/y85bttty>
- Lenovo. (2024). *O que é A4?* <https://tinyurl.com/543dw52m>
- Lerzoni Consultoria e Escola de Negócios. (2018). *5S: Saiba como aproveitar o máximo dessa ferramenta!* <https://tinyurl.com/2e72rxsp>
- Letcher, T. M. (2019). Why do we have global warming? In *Managing Global Warming* (pp. 3–15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00001-6>
- Li, G., Niu, M., & Huang, J. (2023). Evolution of energy systems: Patterns and mechanisms. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101200. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2023.101200>

- Liu, J., Yuan, C., Hafeez, M., & Li, X. (2020, June 6). ISO 14001 certification in developing countries: motivations from trade and environment. *Journal of Environmental Planning and Management*, 1241–1265. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1649642>
- Loureiro, D. (2022). *Sistemas Térmicos - Solar Térmico*. <https://tinyurl.com/yck5zt77>
- Maamoun, N. (2019). The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success. *Journal of Environmental Economics and Management*, 95, 227–256. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.04.001>
- Macolis. (2024). *Energia solar térmica*. <https://tinyurl.com/yc58t76y>
- Malagueta, D. (2012). *GERAÇÃO HELIOTÉRMICA PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS*. <https://tinyurl.com/3wm5xybt>
- Malar, J. P. (2021). Entenda como ondas e marés podem gerar energia no Brasil. *CNN Brasil*. <https://tinyurl.com/3n68uyrn>
- Martínez, L. (2010). *CRITERIOS Y EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS SOFTWARE PARA DAR SOPORTE A LA IMPLANTACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM [ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL Y GESTIÓN DE EMPRESAS]*, Universidad de Sevilla]. <https://tinyurl.com/49a648vz>
- Ministério das Relações Exteriores do Brasil. (2016). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. *A/RES/70/1*. <https://tinyurl.com/4f4hmnjz>
- Mirza, Z. T., Anderson, T., Seadon, J., & Brent, A. (2024). A thematic analysis of the factors that influence the development of a renewable energy policy. *Renewable Energy Focus*, 49, 100562. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100562>
- Moraes, C. (2020, May 5). *CÉLULA FOTOVOLTAICA: TUDO QUE VOCÊ PRECISA SABER*. *Eletronicadepotencia.Com*.
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2019). Global renewable energy resources and use in 2050. In *Managing Global Warming* (pp. 221–235). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00006-5>
- Nan, S., Huang, J., Wu, J., & Li, C. (2022). Does globalization change the renewable energy consumption and CO2 emissions nexus for OECD countries? New evidence based on the nonlinear PSTR model. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100995. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100995>
- Nati, M. (2024). *Understanding Mean Time to Failure (MTTF) Calculations for Maintenance*. <https://tinyurl.com/y46rxnhu>
- National Inventors Hall of Fame. (2024). *Clarence Kemp Passive Solar Water Heater U.S. Patent No. 451,384 Inducted in 2011*. <https://tinyurl.com/44ymmv8y>
- Negri, R. G., Capeletti, M. B., Silva, L. N. F. da, Abaide, A. da R., & Hammerschmitt, B. K. (2024). *MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: CONTEXTUALIZAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA E CARACTERIZAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS*. In *Engenharia elétrica e de computação: conceitos fundamentais e aplicações práticas* (pp. 26–38). Atena Editora. <https://doi.org/10.22533/at.ed.1462411013>
- Obiora, S. C., Bamisile, O., Hu, Y., Ozsahin, D. U., & Adun, H. (2024). Assessing the decarbonization of electricity generation in major emitting countries by 2030 and 2050: Transition to a high share renewable energy mix. *Heliyon*, 10(8), e28770. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28770>

- Patrício, I. (2024). “*Está absolutamente fechado*”. *Salário mínimo sobe para 870 euros em 2025*. <https://tinyurl.com/5n6njyd3>
- Pereira, R. (2018b). *Manutenção e otimização de sistemas de energia hospitalar – Uma abordagem Lean* [Projeto de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra]. <https://tinyurl.com/wbduvss>
- Pimenta, M. (2024). *5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA GEOTÉRMICA*. <https://tinyurl.com/bddjja39>
- Poland, M. (2024). *Get to know the PAS 55 asset management standard*. <https://tinyurl.com/un3n83n5>
- Poór, P., Ženišek, D., & Basl, J. (2019, July). Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://tinyurl.com/3arvsuju>
- Portal Solar. (2024). *Quanta energia produz um painel solar?* <https://tinyurl.com/4d4a9bbx>
- Priberam Informática. (2024). *energia*. <https://dicionario.priberam.org/energia>
- Proteu. (2023). *Catálogo Solar térmico e AQS*. <https://tinyurl.com/ycxk9hvp>
- Público. (2022). *Clima: Portugal quer antecipar neutralidade carbónica para 2045*. <https://tinyurl.com/4we4vrzn>
- Ramos, A. (2024). *MeyGen: maior projeto de energia das marés do mundo foi lançado na Escócia!* <https://tinyurl.com/br8jb74r>
- República Portuguesa. (2019). *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*. <https://tinyurl.com/yymmtrdaa>
- Ribeiro, J. (2018). *Manutenção em ambiente hospitalar* [Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto]. <https://tinyurl.com/2tp26vaz>
- Rio, J. (2011). *Geotermia e implicações nas tecnologias da construção - estudo de casos* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/63378>
- Selectra. (2024). *Como calcular o preço kWh da eletricidade e gás natural em Portugal*. <https://selectra.pt/energia/precos/kwh>
- SenseMore. (2024). *The Evolution of Maintenance Strategies*. <https://tinyurl.com/ywsut348>
- Silva, D. (2022). *Instalação de um sistema geotérmico de grande dimensão na Quinta da Ombria* [Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal]. <https://tinyurl.com/yrd5zrs7>
- Silva, R. (2019). *Cartas de Controlo: para que servem e quais as regras a aplicar?* <https://tinyurl.com/bde9sd2f>
- Silveira, E. (2022). Por que Einstein recebeu Nobel “atrasado” e nunca foi premiado por Teoria da Relatividade. *BBC News Brasil*. <https://tinyurl.com/vn9r83bh>
- Silvério, M. (2012). *Projeto Três Gargantas: Cidade e Território na China* [Monografia, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e de Design da Universidade de São Paulo]. <https://tinyurl.com/yc3uy3za>
- Singer. (2019). *La storia Singer*. <https://www.singer.it/la-storia-singer/>
- Smyth, M., Eames, P. C., & Norton, B. (2006). Integrated collector storage solar water heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 503–538. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.11.001>

- Soares, F. (2015). *Introdução da Manutenção Preventiva Sistemática nos SASUC* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra]. <https://tinyurl.com/2fh795nf>
- Soares, M. (2024). *Principais cientistas climáticos preveem um aquecimento global de 2,5°C este século*. <https://tinyurl.com/bdd6p8hb>
- Solfácil. (2024). *Quanto kWh gera uma Placa Solar e como calcular a quantidade de painéis?* <https://tinyurl.com/28a6spus>
- Sousa, C., & Franco, T. (2018). *Projeto e instalação de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de distribuição* [Monografia, Universidade Federal do Paraná]. <https://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/493.pdf>
- Stumpf, K. (2023). *Valor presente: o que é, como funciona e como calcular*. <https://tinyurl.com/4c363exv>
- TERRA NETWORKS BRASIL. (2019). O Brasil é um dos países com maior potencial para geração de energia solar. *Terra*. <https://tinyurl.com/yc33fypb>
- Thompson, M. (2024). *Um guia completo para usina hidrelétrica*. <https://tinyurl.com/57ae3phc>
- Trancho, J. (2022). *Gestão de equipamentos e implementação da qualidade na justa prioridade LDA* [Instituto Superior de Engenharia de Coimbra]. <https://tinyurl.com/5ppuzv7u>
- Valente, I. (2024). *Marcação CE e o papel dos Organismos Notificados*. <https://tinyurl.com/fa27euyz>
- Vazzoler, A. (2021). *Fundamentos de sistemas solares térmicos*. <https://tinyurl.com/55wa2kdd>
- Velásquez, R., & Zloccowick, J. (2018). *Expansão da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis*.
- Virgílio, H. (2018). *MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL NO MELHORAMENTO PRODUTIVO ORGANIZACIONAL* [UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA]. <https://tinyurl.com/5n92x53a>
- Voiland, A. (2022). *Aproveitando o sol no deserto de Thar*. <https://tinyurl.com/54uau643>
- World Bank Group. (2019). *Potencial de densidade de energia eólica*. <https://tinyurl.com/mr2khffm>
- Xavier, B. (2024). *Conheça as principais filosofias de gestão da produção*. <https://tinyurl.com/4j37khvt>

## ANEXO 1 - PROPOSTA COMERCIAL PARA INSTALAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.

DATASHEET DO PROJETO		
<b>DADOS TÉCNICOS</b>		
Potência do Sistema Solar	2,75	kWp
Nível de Tensão	220	V
Quantidade de Módulos	5	Und.
Potência dos Módulos	550	Wp
Modelo dos Módulos	JAM72S30-550/MR	
Fabricante do Módulo	JA SOLAR	
Quantidade de Inversores	1	Und.
Potência total do Inversor	3	kW
Modelo do Inversor	SG3.0RS-L	
Fabricante do Inversor	SUNGROW	
<b>DADOS DE CONSUMO</b>		
Valor da Tarifa	R\$	1,0762
Custo Mensal	R\$	269,05
Custo Anual	R\$	3.555,36
Consumo Médio Mensal	250,00	kWh/mês
Consumo Anual	3.000	kWh/ano
<b>DADOS DE GERAÇÃO</b>		
Geração Média Mensal Estimada	324,17	kWh/mês
Geração Média Anual Estimada	3.890	kWh/ano
Economia Potencial Mensal Estimada	R\$	348,87
Economia Potencial Anual Estimada	R\$	4.186,42
Percentual Excedente	29,67	%
<b>DADOS DA UNIDADE GERADORA</b>		
Conta Contrato		
Titular da Unidade Consumidora		
Cidade/Estado		
Tipo de Cobertura	FIBROCIMENTO	
Tipo da Ligação	MONOFÁSICO	
Nível de Tensão da Unidade Geradora	220	V
<b>GARANTIAS</b>		
Garantia dos Inversores	10	Anos
Garantia dos módulos	12	Anos
Garantia de 82% da eficiência dos módulos	25	Anos
Garantia da Instalação	1	Anos
<b>PAGAMENTO</b>		
70% - Material - Parcelável em até 21x (Juros de 0,79% a.m.)		R\$ 7.321,34
30% - Serviço		R\$ 3.137,72
<b>VALOR DO GERADOR + SERVIÇO DE INSTALAÇÃO</b>		<b>R\$ 10.459,06</b>
Prazo de Instalação Após o Pagamento da Entrada		60 Dias
Obs: Para instalação de sistema solar fotovoltaico é necessário rede de 220V		

## ANEXO 2 - PROPOSTA COMERCIAL PARA INSTALAÇÃO SISTEMA SOLAR TÉRMICO.

Quant.	Equipamento	SOLIS	KOMEÇO
1	Sistema aquecimento solar 800 litros aço 304 + 4 coletores de cobre 2 x 1 mts	R\$ 15.803,12	R\$ 14.021,52
1	Mão de obra instalação NÃO INCLUSA		
	<b>Valor total</b>		

Quant.	Equipamento	SOLIS	KOMEÇO
1	Sistema aquecimento solar 1000 litros aço 304 + 5 coletores de cobre 2 x 1 mts	R\$ 18.428,06	R\$ 17.391,90
1	Mão de obra instalação NÃO INCLUSA		
	<b>Valor total</b>		

**MÃO DE OBRA A COMBINAR**

**Forma de Pagamento: Entrada + 30/60/90, a vista 5% de desconto**

**1) Metodologia**

- Itens não inclusos:** Todos os materiais para a instalação, (tubos e conexões).
- A estrutura de sustentação do reservatório térmico e coletores, caso necessário, será de responsabilidade do cliente.
- O local onde será instalado(s) o(s) reservatório(s), coletor (es), tubulações, válvulas, registro, pressurizadores(es) deverá ter adequada retenção e escoamento de água oriunda de vazamento acidentais ou drenagens para manutenção.
- O reservatório térmico deverá ser colocado no local da instalação e é de **responsabilidade do contratante**.
- Durante a instalação do sistema, caso este seja no telhado, pode haver quebra de telhas, que deverão estar disponíveis no local, e devem ser fornecidas pelo contratante para substituição imediata.  
O Fabricante e a Conquista Solar não se responsabilizarão por eventuais danos diretos ou indiretos por consequência de vazamento acidentais do sistema de aquecimento.
- A água utilizada no sistema de aquecimento deverá possuir as seguintes características físico-químicas: PH 7,0 a 8,5, Dureza (CaCO) 60,0 a 150 ppm, Teor de cloro menor que 120 ppm, Teor de ferro menor que 0,3 ppm, Cloro livre menor que 3 ppm, Teor de alumínio menor que 0,2 ppm.

**GARANTIA:** Todos os produtos descritos neste orçamento têm sua garantia direta da Fabricante. Garantia válida somente com a instalação correta dos equipamentos, seguindo normas técnicas e manuseio correto. A garantia se aplica em caso de defeito de fabricação do equipamento. No momento em que é acionada; o equipamento em garantia deverá ser enviado à fábrica com custo do transporte a ser pago pelo cliente. E após ser analisado e confirmado a garantia, os valores são ressarcidos e o equipamento devidamente trocado.

## ANEXO 3 - PÁGINA DE VENDA DO DISCO COLETOR.

**Características do produto**

Características principais		Outros	
Marca	Panocem	Temperatura mínima	5 °C
Modelo	PLACA SOLAR G1	Temperatura máxima	34 °C
Quantidade máxima de área útil	8 m <sup>2</sup>	Pecas incluídas	Pecas

**Descrição**

SISTEMA DE AQUECIMENTO PARA PISCINAS GIRASSOL SOLAR

SUA DIVERSÃO NA TEMPERATURA CERTA !!

ITENS INCLUSOS:

- 2 COLETORES CIRCULARES/ ESPIRALADOS
- 2 ADAPTADORES DE 25mm
- 2 COLARES DE TOMADA DE 32mm
- 1 UNIÃO DE 25mm

PRINCIPAIS BENEFÍCIOS:

- Melhor relação custo x benefício do mercado;
- Ideal para espaços reduzidos nos telhados;
- Ocupa uma área 4 vezes menor no telhado do que os sistemas convencionais;
- Pode ser instalado na horizontal (telhado platibanda);
- Maior volume de água aquecida;
- Maior pressão e vazão - Permite aquecer a água da piscina em menor tempo;
- Possibilidade de expansão do sistema;
- Único no mercado com polímero de alta performance (exclusivo da marca).

**Vendido por NADE:**  
+5mil Produtos

**Mercoledì Gald**  
É um dos melhores do site!

- +5mil Vendas concluídas
- Clientes satisfeitos
- Entrega de produtos dentro do prazo

Ver mais produtos do vendedor

**Outras opções de compra**

**R\$ 741,17** Parcelamento sem juros

- 10x R\$ 74,15 sem juros
- Chegará grátis entre 13 e 14/dez por ser sua primeira compra
- Retire grátis entre 13 e 14/dez em uma agência Mercado Livre

Vendido por **NADE**  
+5mil vendas

Comprar agora Adicionar ao carrinho

Ver mais opções a partir de R\$ 672,17

**Meios de pagamento**

Conta de Crédito

mercado pago

Cartões de crédito

Pague em até 12x:

América, Elo, VISA

Fonte: (Ebazar, 2024)



**Instituto Superior  
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra