



Aplicação de energias renováveis a sistemas de contentores militares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica Militar

Alferes-Aluno Simão Amaral Neves

Orientadores:

Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Professor Doutor Pedro Nuno Mendonça dos Santos

Júri

Presidente: Professora Doutora Paula Manuela dos Santos Lopes do Rego Figueiredo

Orientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Vogal: Tenente-Coronel de Serviço de Material Luís Filipe Pratas Quinto

Academia Militar - Lisboa

2023/2024



Aplicação de energias renováveis a sistemas de contentores militares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica Militar

Alferes-Aluno Simão Amaral Neves

Orientadores:

Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Professor Doutor Pedro Nuno Mendonça dos Santos

Júri

Presidente: Professora Doutora Paula Manuela dos Santos Lopes do Rego Figueiredo

Orientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Vogal: Tenente-Coronel de Serviço de Material Luís Filipe Pratas Quinto

Academia Militar - Lisboa

2023/2024

Agradecimentos

A realização da presente dissertação representa um marco significativo no meu percurso acadêmico, para tal, gostaria de expressar a minha profunda gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor João Torres e Professor Doutor Pedro Santos, pelo apoio incansável, orientação e constante incentivo ao longo de todo este processo. Os seus conhecimentos, a paciência e a dedicação foram pilares essenciais para o desenvolvimento deste projeto.

Este trabalho foi apoiado em parte pela FCT/MCTES através de fundos nacionais e em parte por fundos cofinanciados da UE no âmbito do Projeto UIDB/50008/2020.

À minha namorada, Matilde, um agradecimento muito especial por todo o amor, carinho e paciência demonstrados ao longo desta jornada e durante a elaboração da minha dissertação de mestrado.

Aos meus avós, "Peter" e António Amaral, que, embora já não estejam presentes, sempre me apoiaram e se orgulharam das minhas escolhas e conquistas ao longo deste percurso.

Agradeço também aos meus familiares, principalmente aos meus pais, Rui e Elisabete, e avós, Maria Hermínia e Francisca, que sempre me deram o carinho e força necessários para ultrapassar os momentos mais difíceis.

Aos meus amigos de infância, sou profundamente grato pelos momentos partilhados e pela amizade constante.

Aos meus camaradas de curso da Academia Militar, agradeço pelo companheirismo, pela camaradagem e pela partilha de conhecimentos, que tornaram esta jornada marcante. O culminar dos passados seis anos de elevada exigência só foi possível graças ao vosso apoio que também contribuiu para tornar o percurso único.

Expresso também a minha gratidão aos professores, comandantes, instrutores e a todos os elementos responsáveis da Academia Militar, que sempre estiveram disponíveis para me apoiar, dedicando o seu tempo e esforço na minha formação, tanto a nível pessoal como militar.

Por fim, agradeço a todas as pessoas e instituições que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, o meu mais sincero obrigado!

Resumo

A aplicação de energias renováveis está a tornar-se cada vez mais comum em diversas áreas, incluindo no contexto militar. Este trabalho tem como objetivo integrar as energias renováveis em sistemas de contentores militares, visando a produção de energia para autoconsumo e, consequentemente, a redução da dependência de combustíveis fósseis.

A presente dissertação inicia com uma revisão abrangente da literatura sobre as três principais fontes de energias renováveis: solar, eólica e hidráulica, seguida da apresentação das aplicabilidades e características específicas dos sistemas de contentores militares. Também foi realizada uma investigação em relação ao envolvimento de Portugal em diversas regiões do mundo.

Em relação ao estado da arte, o objetivo deste capítulo é apresentar diferentes estudos realizados no contexto da aplicação de energias renováveis a sistemas de contentores militares, com ênfase na implementação de sistemas híbridos de energia para esses contentores.

Na metodologia adotada para este estudo são definidos os métodos e ferramentas necessárias para alcançar os resultados pretendidos. Foram projetados dois sistemas híbridos para duas localizações distintas: República Centro-Africana e Roménia.

Os resultados obtidos demonstram que a incorporação de energias renováveis a sistemas de contentores militares é economicamente e ambientalmente vantajosa para as Forças Nacionais Destacadas. Estes sistemas não só poderão reduzir custos operacionais, como também aumentar a sustentabilidade e resiliência energética das operações militares.

Palavras-chave: Energias Renováveis, Força Nacional Destacada, Sistemas de Contentores Militares, República Centro-Africana, Roménia.

Abstract

The application of renewable energies is becoming increasingly common in various areas, including the military context. The aim of this work is to integrate renewable energies into military container systems, with a view to producing energy for self-consumption and, consequently, reducing dependence on fossil fuels.

This dissertation begins with a comprehensive literature review on the three main sources of renewable energy: solar, wind and hydro, followed by a presentation of the applicability and specific characteristics of military container systems. Research was also carried out into Portugal's involvement in various regions of the world.

As for the state of the art, the aim of this chapter is to present different studies carried out in the context of the application of renewable energies in military container systems, with an emphasis on the implementation of hybrid energy systems for these containers.

The methodology adopted for this study initially defines the methods and tools needed to achieve the desired results. Two hybrid systems were designed for two different locations: the Central African Republic and Romania.

The results obtained show that incorporating renewable energies into military container systems is economically and environmentally advantageous for deployed national forces. These systems could not only reduce operating costs, but also increase the sustainability and energy resilience of military operations.

Keywords: Renewable Energy, National Deployed Force, Military Containers Systems, Central African Republic, Romania.

Índice

Resumo	vii
Abstract	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xvii
Lista de Constantes	xix
Lista de Símbolos	xxii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Descrição Geral	2
2 Revisão da Literatura	3
2.1 Energias Renováveis	3
2.1.1 Energia Solar	3
2.1.1.1 Princípio do funcionamento das células solares	4
2.1.1.2 Importância da temperatura, irradiância e sombreamento	5
2.1.1.3 Gerações das células solares	7
2.1.2 Energia Eólica	8
2.1.2.1 Modelo de Turbina Eólica de Velocidade Constante	9
2.1.2.2 Modelo de Turbina Eólica de Velocidade Variável	9
2.1.2.3 Distribuição do vento e potência disponível	10
2.1.3 Energia Hidráulica	11
2.1.3.1 Especificações de uma turbina hidráulica	11
2.1.3.2 Produção de Energia	13
2.2 Componentes Complementares do Gerador Híbrido	14
2.2.1 Inversores	14
2.2.2 Controlador Híbrido	15
2.2.3 Cabos	15
2.2.4 Dispositivos de proteção	15
2.3 Sistemas de Contentores Militares	15
3 Estado da Arte	19
3.1 Estudo 1 - <i>A Smart Hybrid Energy System Grid for Energy Efficiency in Remote Areas for the Army</i>	19
3.2 Estudo 2 - <i>Performance Analysis of a Solar-Powered Multi-Purpose Supply Container</i>	22
3.3 Estudo 3 - <i>Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind/PV Systems</i>	23

4	Metodologia	29
4.1	Painéis Solares	29
4.2	Turbinas Eólicas	30
4.3	Análise do Terreno e Infraestrutura	31
4.3.1	Análise Climatológica	31
4.3.2	Dimensionamento da Carga	32
4.4	Dimensionamento do Sistema	32
5	Resultados	37
5.1	Painéis Solares	37
5.2	Turbinas Eólicas	38
5.3	Análise da Infraestrutura	39
5.3.1	Análise Climatológica	40
5.3.2	Dimensionamento da Carga	42
5.4	Dimensionamento do Sistema	43
5.4.1	Comparação do sistema dimensionado - Roménia	46
5.5	Influência no Rendimento	52
6	Discussão	57
6.1	Avaliação de Cenários	57
6.2	Análise Tático-Operacional	58
7	Conclusão	59
	Referências	65
A	Anexos - Algoritmo de Otimização	67
B	Anexos - Resultados	77

Índice de Figuras

2.1	Painel Fotovoltaico.	4
2.2	Absorção ótica num semiconductor.	4
2.3	Circuito de uma célula solar e uma resistência.	5
2.4	Curvas características com a variação da temperatura.	6
2.5	Curvas características com a variação da irradiância.	6
2.6	Curvas características I-V e P-V com e sem sombra.	7
2.7	Rendimento das diversas tecnologias de conversão.	8
2.8	Turbina eólica de eixo horizontal.	8
2.9	Princípio básico da produção de energia eólica.	9
2.10	Estrutura geral do modelo CSWT.	9
2.11	Estrutura geral do modelo VSWT.	10
2.12	Relação geral entre $f(v_w)$ e $F(v_w)$	11
2.13	Turbinas hidroelétricas Francis, Pelton e Kaplan.	12
2.14	Planta geral de uma central hidráulica.	12
2.15	Sistema externo e respetivo exemplo.	13
2.16	Sistema interno e respetivo exemplo.	13
2.17	Gráfico de potência de saída/queda de pressão.	14
2.18	11 ^a FND na RCA.	16
2.19	Tenda de um RTC.	16
2.20	Três modelos de contentores.	17
3.1	Arquitetura do SHES.	20
3.2	SHES: Esquemático detalhado do HVAC e gerador do RTC.	21
3.3	Interface e aplicações do contentor de abastecimento.	22
3.4	Circuito básico que alimenta o contentor.	23
3.5	Sistema híbrido proposto.	24
3.6	Exigência energética em média por hora.	25
3.7	Velocidade do vento em média por hora.	25
3.8	Irradiância média por hora.	26
3.9	Diferença entre a energia produzida e consumida de cada sistema.	27
4.1	Circuito equivalente do 1M3P.	29
4.2	Configuração típica do gerador híbrido.	33
4.3	Lógica do dimensionamento manual do Algoritmo 1.	34
4.4	Lógica da otimização do sistema do Algoritmo 1.	35
5.1	Painel solar <i>SZ-100-33MF</i>	37
5.2	Curvas características do <i>SZ-100-33MF</i>	38
5.3	Turbina eólica <i>Aeolos-V 10kW</i>	39
5.4	Curva de potência da turbina eólica <i>Aeolos-V 10kW</i>	39
5.5	Vista aérea do campo na RCA.	40
5.6	Medição da área disponível para o gerador.	40
5.7	Temperatura média diária na RCA.	41
5.8	Irradiância média diária na RCA.	41
5.9	Humidade ao longo dos meses de dezembro e agosto na RCA.	41
5.10	Velocidade do vento ao longo dos meses de dezembro e agosto na RCA.	42
5.11	Esquema elétrico do campo na RCA.	42
5.12	Consumo médio por hora.	43

5.13	Curvas consumo-geração.	44
5.14	Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema dimensionado na RCA.	45
5.14	Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema dimensionado na RCA - continuação.	46
5.15	Temperatura média diária na Roménia.	47
5.16	Irradiância média diária na Roménia.	47
5.17	Humidade ao longo dos meses de dezembro e agosto na Roménia.	47
5.18	Velocidade do vento ao longo dos meses de dezembro e agosto na Roménia.	48
5.19	Curvas consumo-geração do sistema dimensionado e do sistema otimizado na Roménia. . .	49
5.20	Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema dimensionado na Roménia.	50
5.21	Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema otimizado na Roménia.	51
5.22	Curvas características I-V e P-V com e sem impurezas.	52
5.22	Curvas características I-V e P-V com e sem impurezas - continuação.	53
5.23	Curvas características I-V e P-V com céu limpo e céu nublado.	53
5.23	Curvas características I-V e P-V com céu limpo e céu nublado - continuação.	54
5.24	Curvas características I-V e P-V com e sem humidade.	54
5.24	Curvas características I-V e P-V com e sem humidade - continuação.	55
B.1	Temperatura média diária para os restantes meses na RCA.	78
B.2	Irradiância média diária para os restantes meses na RCA.	79
B.3	Humidade ao longo dos restantes meses na RCA.	80
B.4	Velocidade do vento ao longo dos restantes meses na RCA.	81
B.5	Curvas consumo-geração dos restantes meses na RCA.	82
B.6	Temperatura média diária para os restantes meses na Roménia.	83
B.7	Irradiância média diária para os restantes meses na Roménia.	84
B.8	Humidade ao longo dos restantes meses na Roménia.	85
B.9	Velocidade do vento ao longo dos restantes meses na Roménia.	86
B.10	Curvas consumo-geração do sistema dimensionado e do sistema otimizado dos restantes meses na Roménia.	88
B.11	Curvas consumo-geração do sistema dimensionado e do sistema otimizado dos restantes meses na Roménia - continuação.	89

Índice de Tabelas

2.1	Condutividade térmica dos materiais.	16
2.2	Preços dos contentores.	17
3.1	Inclinações otimizadas nas diferentes cidades.	20
3.2	Resultados das emissões anuais de CO ₂ em diferentes climas.	21
3.3	Resultados da produção de energia.	23
3.4	Preço e potência de cada componente do sistema.	26
3.5	Configuração de cada sistema.	26
5.1	Parâmetros do painel solar <i>SZ-100-33MF</i>	38
5.2	Parâmetros da turbina eólica <i>Aeolos-V 10kW</i> [80].	39
5.3	Especificações dos geradores.	42
5.4	Restantes parâmetros para o dimensionamento do gerador híbrido.	43
5.5	Resultados do dimensionamento do gerador híbrido.	44
5.6	Mínimos e máximos dos fatores financeiros consoante o rendimento do inversor solar na RCA.	46
5.7	Comparação do sistema dimensionado e o sistema ótimo na Roménia.	48
5.8	Mínimos e máximos dos fatores financeiros consoante o rendimento dos inversores na Ro- ménia.	52
B.1	Área disponível para implementação do gerador híbrido.	77
B.2	Custos mensais do sistema dimensionado na RCA.	81
B.3	Custos mensais com o sistema dimensionado e o sistema otimizado na Roménia.	87

Lista de Abreviaturas e Siglas

1M3P Modelo Ideal de Díodo Único.

AMG Armazenamento de Material de Guerra.

CSWT *Constant Speed Wind Turbine*.

ER Energias Renováveis.

FND Força Nacional Destacada.

GNR Guarda Nacional Republicana.

HVAC *Heating, Ventilation and Air Conditioning*.

MINUSCA Missão Multidimensional Integrada das Nações Unidas para a Estabilização da República Centro-Africana.

NREL *National Renewable Energy Laboratory*.

ONU Organização das Nações Unidas.

OTAN Organização do Tratado do Atlântico Norte.

PAE Produção Anual de Energia.

PRI Prazo de Retorno do Investimento.

PVGIS *Photovoltaic Geographical Information System*.

RCA República Centro-Africana.

ROI Retorno sobre o Investimento.

RTC *Relocatable Temporary Camps*.

SHES *Smart Hybrid Energy System*.

TO Teatros de Operações.

VSWT *Variable Speed Wind Turbine*.

Lista de Constantes

Constante	Nome	Valor
g	Aceleração gravítica	9.81 m/s^2
h	Constante de <i>Boltzmann</i>	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}$
h	Constante de <i>Planck</i>	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
$\rho_{\text{água}}$	Densidade da água	10^3 kg / m^3

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
A_{ativa}	Área ativa da célula	m^2
A_r	Área varrida pelo rotor	m^2
q	Carga do eletrão	C
C_p	Coeficiente de potência	-
I_{cc}	Corrente de curto-circuito	A
I	Corrente de saída	A
I_o	Corrente de saturação do díodo	A
I_d	Corrente do díodo	A
I_{fv}	Corrente fotovoltaica	A
$CFin$	Custos financeiros do projeto	€
ρ_{ar}	Densidade do ar	kg / m^3
Δh	Diferença de cotas	m
θ	Direção do vento	$^\circ$
η_{cel}	Eficiência de uma célula solar	-
η_{te}	Eficiência de uma turbina eólica	-
E_g	Energia da banda proibida	eV
FF	Fator de Forma	-
k	Fator de Forma da lei de Weibull	-
c	Fator de escala da lei de Weibull	-
b	Fator de não idealidade do díodo	-
Q	Fluxo do caudal	m^3/s
f	Frequência	Hz
$GFin$	Ganhos financeiros do projeto	-
G	Irradiância	W / m^2
I_0	Investimento inicial	-
P	Potência de saída	W
$P_{\text{máx}}$	Potência máxima	W
P_w	Potência mecânica da turbina eólica	W

Símbolo	Significado	Unidade
P_h	Potência mecânica da turbina hidráulica	W
λ	Rácio da velocidade de ponta	-
R	Raio de rotação do rotor da turbina eólica	m
GP	Receita anual	-
T	Temperatura	K
V_{ca}	Tensão de circuito aberto	V
V	Tensão de saída	V
v_w	Velocidade ascendente do rotor da turbina eólica	m/s
v_t	Velocidade de ponta da pá da turbina eólica	m/s

1 Introdução

1.1 Motivação

Atualmente, torna-se cada vez mais relevante o desenvolvimento de soluções inovadoras em alinhamento com práticas sustentáveis. Deste modo, a motivação da presente dissertação fundamenta-se na necessidade de adoção de recursos sustentáveis no meio militar.

As Energias Renováveis (ER), fontes de energia limpa e sustentável, numa visão global são uma vantagem face às energias não renováveis, pelos seguintes motivos:

- As ER, destacando as energias solar, eólica e hidráulica, são fontes de energia sustentáveis que providenciam energia para alimentação dos sistemas de contentores militares sem comprometer a sustentabilidade ambiental. Paralelamente, ao minimizarem a necessidade de transporte de combustíveis ou baterias para alimentar geradores, contribuem para a redução da pegada de carbono, que representa o volume total de gases com efeito de estufa, otimizando simultaneamente os custos logísticos.
- Redução do risco de segurança pois a integração das ER nestes sistemas pode reduzir a necessidade de transportar grandes quantidades de combustível para alimentar geradores, o que atenua o risco de incidentes relacionados com a segurança, como incêndios ou explosões.
- Melhoria da eficiência operacional uma vez que as ER viabilizam operações militares sem interrupções relacionadas com fontes de energia para os equipamentos necessários no decorrer da mesma. Além de sustentarem equipamentos militares, as ER podem ser utilizadas para alimentar sistemas de comunicação, iluminação, entre outros.
- Redução dos custos pelo que a utilização de fontes de ER pode reduzir os custos operacionais ao longo do tempo.

Os contentores militares são frequentemente utilizados em locais remotos e de difícil acesso, onde a escassez ou inexistência de energia elétrica é uma realidade. Assim, a aplicação prática de ER em sistemas de contentores militares está alinhada com a sustentabilidade e ultrapassa alguns dos aspetos negativos mencionados anteriormente.

1.2 Objetivo

A exigência energética nos sistemas de contentores militares utilizados como bases operacionais temporárias é bastante elevada, dada a necessidade de fornecer energia a diversos componentes, tais como comunicações, iluminação, refrigeração e outros dispositivos.

O conhecimento atual sobre as ER em sistemas de contentores militares destaca a viabilidade e eficácia das mesmas como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis e outras fontes de energia não renovável, como o gás natural. A eficiência das operações militares beneficiará com a introdução de fontes alternativas de energia, uma vez que esta medida não só diminuirá a dependência de combustíveis fósseis, como também resultará na redução dos custos associados à energia, das emissões de gases com efeito de estufa e de quaisquer outros poluentes atmosféricos. Simultaneamente, a utilização de fontes de ER em sistemas de contentores militares pode aumentar a autonomia das operações, ao permitir que sejam menos dependentes das redes elétricas locais.

Neste sentido, o objetivo da dissertação consiste em analisar a aplicação de ER em sistemas de contentores militares, com o propósito de alcançar benefícios significativos em termos de eficiência energética, sustentabilidade e segurança operacional. Pretende-se assim tornar as operações militares mais resilientes e sustentáveis.

1.3 Descrição Geral

A presente dissertação de mestrado é composta por seis capítulos. O presente capítulo inicia com um breve enquadramento das ER no contexto militar, seguido da motivação e apresentação do objetivo delineado para este trabalho. O capítulo 2 consistirá numa análise crítica da literatura sobre ER, nomeadamente das energias solar, eólica e hidráulica, e da sua aplicação em sistemas de contentores militares. No capítulo 3, explorar-se-ão diversos estudos e investigações já realizados neste domínio, com um enfoque especial nos sistemas de contentores implementados e possíveis modelos de contentores autossustentáveis. O capítulo 4 fornecerá uma orientação detalhada sobre os aspetos fundamentais a considerar no desenvolvimento do trabalho, de modo a alcançar o objetivo delineado. No capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho. O capítulo 6 será dedicado à análise e discussão dos resultados obtidos no capítulo anterior. Por fim, o capítulo 7 contemplará as conclusões essenciais alcançadas no âmbito desta dissertação, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

Para melhor compreensão dos elementos-chave relacionados com a aplicação de ER em sistemas de contentores militares é importante contextualizar adequadamente o assunto e fundamentar as conclusões que surgirão no desenrolar do trabalho.

Iniciando, a secção 2.1 apresenta definições e conceitos fundamentais relativos às ER, destacando apenas as fontes que se enquadram no tema da dissertação, bem como o seu papel no contexto da sustentabilidade. Quanto à secção 2.2, serão enquadrados os componentes complementares a implementar num gerador híbrido. Na secção 2.3 serão abordados os sistemas de contentores militares e os Teatros de Operações (TO) antecedentes e atuais nos quais Portugal esteve e está presente.

2.1 Energias Renováveis

As ER provêm de processos naturais continuamente reabastecidos e inesgotáveis. Esta pode ser obtida através de fontes como o sol, vento, chuva, caudal de rios, materiais orgânicos e calor proveniente das camadas profundas da Terra através de recursos geotérmicos. Como referido no capítulo 1, estes recursos naturais detêm vantagens notáveis em termos de sustentabilidade face aos recursos não renováveis.

No futuro, é incontornável que os recursos não renováveis alcancem um nível de escassez tão elevado que culminem em crises económicas, sociais e especialmente ambientais, sendo o aquecimento global um dos problemas preponderantes. As alternativas residem na adoção de medidas sustentáveis, sendo fundamental que estas sejam concomitantemente sustentáveis a nível financeiro. Estas devem ser passíveis da adoção tanto pela sociedade em geral como pelas empresas, demonstrando vantagem evidente comparativamente às energias não renováveis, pois apenas dessa forma se assegura a transição para a redução da pegada ecológica [1].

2.1.1 Energia Solar

A energia solar é a fonte renovável mais abundante na Terra. Contudo, apesar de ser a mais amplamente utilizada, o seu potencial de aproveitamento não é maximizado, devendo-se principalmente ao custo associado à instalação de um painel solar, dado ser mais dispendioso a curto prazo do que o custo do uso de energias não renováveis [2].

Os painéis solares são geralmente instalados em telhados ou superfícies planas, maximizando a captação solar para a posterior alimentação de sistemas elétricos e eletrónicos, presentes quer no interior quer no exterior dos edifícios. Também podem ser instalados diretamente na superfície terrestre, na condição de ser um terreno aberto, sem interferência de sombras de edifícios, árvores ou infraestruturas de elevadas dimensões, em qualquer altura do dia, de forma a otimizar o rendimento. Os painéis solares destacam-se pela facilidade de adaptação e de implementação.

A inclinação e a orientação dos painéis solares variam consoante o local de instalação, sendo fatores a contemplar aquando da sua instalação, uma vez que o rendimento do painel solar dependerá dos mesmos.

Os painéis solares são constituídos por células fotovoltaicas, que, por sua vez, são compostas por materiais semicondutores, como silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), silício monocristalino, silício policristalino, entre outros [3]. Na Figura 2.1 é possível observar um exemplo de um painel fotovoltaico.



Figura 2.1: Painele Fotovoltaico.
(Retirado de [4])

2.1.1.1 Princípio do funcionamento das células solares

O funcionamento da energia solar baseia-se no fenómeno do efeito fotovoltaico, uma interação física e química resultante da exposição de um tipo de material fotovoltaico a uma radiação específica, levando à geração de corrente elétrica ou à criação de uma tensão elétrica. Este fenómeno foi inicialmente descoberto em 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel, um físico francês, ao observar a produção de corrente elétrica quando dois elétrodos imersos numa solução eletrolítica foram expostos à radiação solar [5]–[7]. É através do efeito fotovoltaico que a energia solar é convertida em energia elétrica, por meio das células fotovoltaicas [8], [9]. É um processo que, em relação à sua alta eficiência, possui custos relativamente baixos e pode ser uma fonte fiável de energia [10].

Uma vez que a radiação solar é composta por fotões, a célula fotovoltaica absorve a energia desses fotões quando exposta a essa radiação. Este fenómeno apenas acontece quando a energia desses fotões, dada por hf , onde h é a constante de *Planck* e f a frequência da radiação, é superior à energia da banda proibida do material, E_g . Após este fenómeno, o fóton absorvido cria um par eletrão-buraco e, em seguida, ocorre a excitação de um eletrão da banda de valência para a banda de condução do semiconductor [11]–[13]. Se este fenómeno não ocorrer, a radiação é transmitida através do material, sendo o semiconductor considerado transparente à radiação. Na Figura 2.2, é possível observar a transição do eletrão.

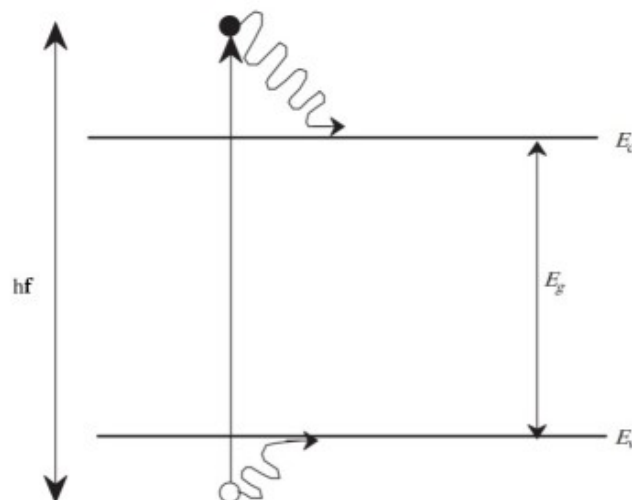


Figura 2.2: Absorção ótica num semiconductor.
(Retirado de [13])

As células fotovoltaicas consistem em díodos semicondutores e a presença de um campo elétrico na região de absorção da radiação é responsável pela separação dos pares elétron-buraco, o que resulta numa diferença de potencial de p para n [14]–[16]. Caso a célula solar esteja conectada a uma resistência externa, a corrente elétrica passará por essa resistência. A Figura 2.3 ilustra o acontecimento descrito.

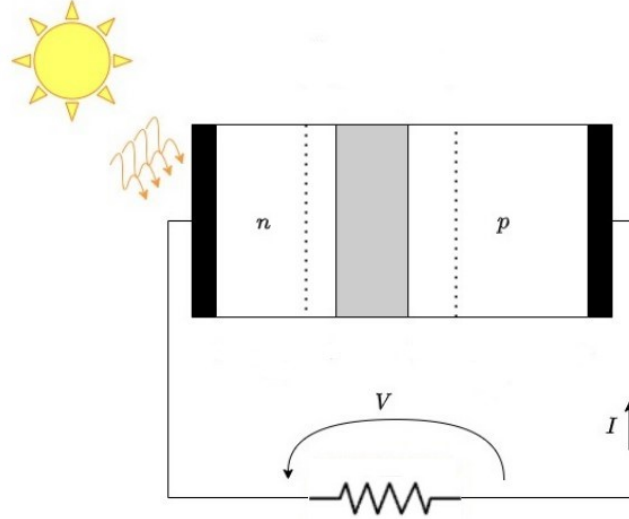


Figura 2.3: Circuito de uma célula solar e uma resistência.
(Adaptado de [16])

Para caracterizar e avaliar uma célula solar, utilizam-se as curvas características I-V e P-V dessa célula. É através de dois parâmetros, eficiência, η_{cel} , e Fator de Forma, FF , que se pode calcular e comparar através das equações 2.1 e 2.2 o desempenho das células solares. Nas equações 2.1 e 2.2, G representa a irradiância e A_{ativa} a área ativa da célula [9], [16], [17].

$$\eta_{\text{cel}} = \frac{P_{\text{máx}}}{G \cdot A_{\text{ativa}}} \quad (2.1)$$

$$FF = \frac{P_{\text{máx}}}{V_{\text{ca}} \cdot I_{\text{cc}}} \quad (2.2)$$

2.1.1.2 Importância da temperatura, irradiância e sombreamento

O desempenho das células solares é diretamente influenciado pela variação tanto da temperatura como da irradiância [18]. A influência da temperatura não é uniforme em todas as tecnologias solares. Além disso, os modelos elétricos, como o Modelo Ideal de Díodo Único (1M3P), podem ser inadequados para algumas células solares, uma vez que são modelos que se ajustam melhor a junções p - n simples [16].

Através das Figuras 2.4 e 2.5 pode-se observar o comportamento mais comum das curvas características dos painéis fotovoltaicos com a variação da temperatura e da irradiância, respetivamente.

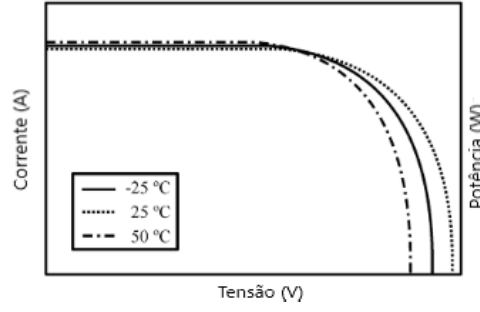


Figura 2.4: Curvas características com a variação da temperatura.
(Adaptado de [19])

Com o aumento da temperatura, a célula/módulo/painel terá uma $P_{\text{máx}}$ de saída e uma V_{ca} inferiores [20]. No entanto, a I_{cc} não apresenta qualquer variação significativa.

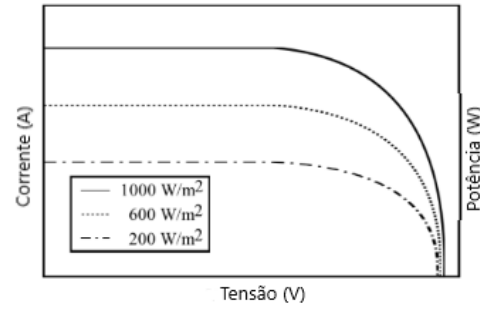


Figura 2.5: Curvas características com a variação da irradiância.
(Adaptado de [19])

Por outro lado, com o aumento da irradiância, a I_{cc} e a V_{ca} serão superiores, mas com uma variação menos substancial de V_{ca} . Com isto, a $P_{\text{máx}}$ de saída irá ser mais elevada.

Analisando as Figuras 2.4 e 2.5, sucede-se que a $P_{\text{máx}}$ apresenta uma maior variação em função da irradiância do que da temperatura. O aumento excessivo da temperatura afeta o rendimento das células. Para atenuar este efeito, podem ser utilizados coletores térmicos, que não só conseguem arrefecer o sistema, como também armazenar o calor produzido e convertê-lo em energia disponível. Outro método é a instalação de materiais de mudança de fase na parte traseira dos painéis fotovoltaicos, que têm a capacidade de absorver o calor durante o processo [16].

Um fator que influencia negativamente o rendimento das células solares é a sombra. Independentemente da quantidade de sombreamento que incide sobre os painéis, este provocará problemas estruturais e uma diminuição da produção de energia [21]. Este fenómeno pode ocorrer devido a impurezas que se acumulam nas células, objetos que caiam na superfície do painel ou à presença de nuvens que impossibilitem a incidência da radiação nos painéis solares [16]. Na Figura 2.6 verifica-se a deformação das curvas I-V e P-V devido ao efeito de sombreamento.

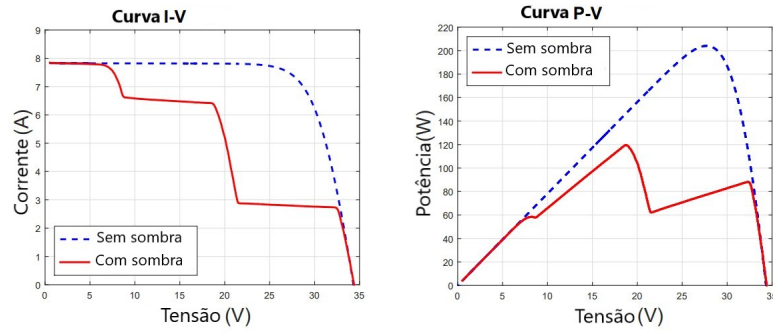


Figura 2.6: Curvas características I-V e P-V com sombra e sem sombra.
(Adaptado de [21])

Como tentativa de controlar este efeito, utilizam-se diodos *bypass*. Estes são instalados em paralelo e estão polarizados inversamente em relação a um conjunto de células, de modo que cada célula tenha a sua proteção. No entanto, os diodos *bypass* também podem contribuir para a degradação das células, visto que ocorrem *hot spots* quando as células sem sombra tentam forçar a sua corrente através das células sombreadas [16].

2.1.1.3 Gerações das células solares

Ao longo do tempo, os avanços tecnológicos permitiram aprimorar a eficiência da conversão de energia solar em eletricidade. Assim sendo, as células fotovoltaicas podem ser classificadas em três gerações diferentes: Células Cristalinas de silício - 1^a geração, Células de Película Fina sobre substratos rígidos - 2^a geração, e Células Híbridas - 3^a geração.

As células de 1^a geração são as estruturas mais utilizadas, dominando o mercado tecnológico e sendo responsáveis por 95% da produção de energia fotovoltaica [16]. Estas subdividem-se em monocristalinas e policristalinas, onde as diferenças entre estes dois tipos de conversão residem na rapidez e no baixo custo de produção associados às células policristalinas. Em contrapartida, as células monocristalinas exibem um rendimento superior [16].

Comparativamente às células de 1^a geração, os materiais que constituem as células de 2^a geração, as tecnologias de película fina, possuem uma capacidade superior de absorção de luz solar, são mais resistentes a altas temperaturas, o custo é inferior e são menos sensíveis ao sombreamento. No entanto, o rendimento é menor nas células de 2^a geração [8], [16].

Relativamente à 3^a e última geração de células fotovoltaicas, esta resulta da fusão das duas gerações precedentes e exhibe vantagens significativas, tais como a diminuição das perdas elétricas e o aumento da eficiência na conversão da energia solar em elétrica. As desvantagens baseiam-se na expansão limitada e nos custos associados substanciais [22], [23].

Conforme ilustrado na Figura 2.7, é possível observar o desempenho das tecnologias de conversão.

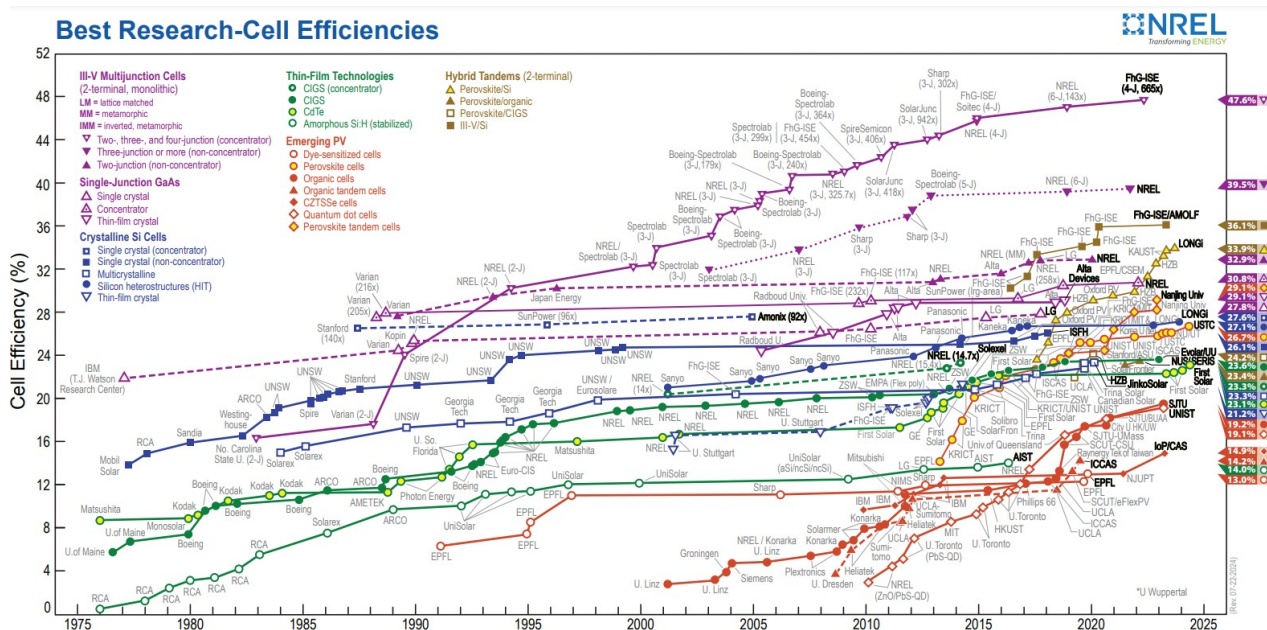


Figura 2.7: Rendimento das diversas tecnologias de conversão.
(Retirado de [24])

2.1.2 Energia Eólica

Tal como todas as ER, a energia eólica é uma fonte de energia limpa, a qual não implica produção de gases com efeito de estufa nem de poluentes atmosféricos [1] e pode ser explorada em solo terrestre, eólica *on-shore*, mas também em centrais no mar, eólica *off-shore* [3]. A energia eólica é uma fonte de energia renovável obtida através de uma turbina eólica que converte a energia cinética do vento em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica [1]. Todavia, a energia eólica não é uma fonte de energia que proporcione garantias quanto à providência de energia, uma vez que o vento existente pode não possuir força suficiente para acionar o movimento das pás da turbina eólica, não sendo gerada eletricidade capaz de alimentar todos os componentes elétricos e eletrónicos. Assim, deve ser dado ênfase à localização, quer geográfica quer territorial, das turbinas. A tecnologia mais comum para o uso desta energia envolve a utilização de uma turbina eólica de eixo horizontal combinada com um gerador, cujo R é o raio de rotação do rotor [3], estando representado na Figura 2.8.

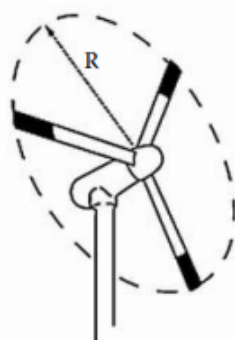


Figura 2.8: Turbina eólica de eixo horizontal.
(Retirado de [25])

O vento, ao incidir nas pás da turbina, pode gerar uma força suficiente para girá-las, sendo que essa rotação resulta na produção de eletricidade. A quantidade de energia produzida depende da velocidade

do vento, do tamanho e do *design* da turbina [3]. Na Figura 2.9, pode-se observar o princípio básico para a produção de energia eólica.

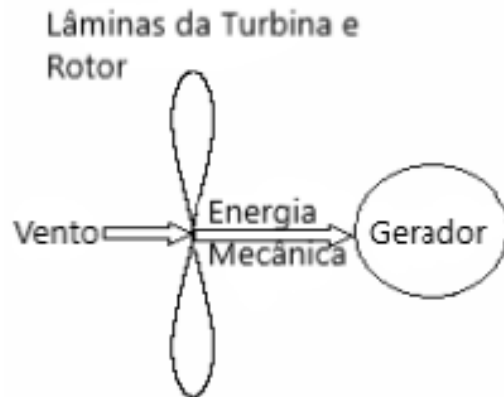


Figura 2.9: Princípio básico da produção de energia eólica.
(Adaptado de [26])

2.1.2.1 Modelo de Turbina Eólica de Velocidade Constante

O presente modelo, *Constant Speed Wind Turbine* (CSWT), assume uma relação algébrica entre a velocidade do vento e a potência mecânica gerada. Por outras palavras, trata-se de um modelo de rotor quase-estático. Este modelo apresenta algumas desvantagens, como a redução da precisão e a negligência da natureza dinâmica da conversão da velocidade do vento em torque mecânico [26].

A estrutura geral do modelo CSWT está representada na Figura 2.10.



Figura 2.10: Estrutura geral do modelo CSWT.
(Adaptado de [26])

É constituído pelo modelo da velocidade do vento que gera a sequência de velocidades do vento. Esta sequência é convertida em potência mecânica pelo modelo do rotor. A potência mecânica é transmitida pelo modelo do eixo, que ajusta a velocidade do rotor e calcula a potência mecânica do gerador. Por sua vez, o gerador utiliza essa potência, tensão e a frequência da rede, para calcular a potência ativa e reativa, que são fornecidas ao modelo da rede elétrica para avaliar o impacto e a integração na rede [26].

2.1.2.2 Modelo de Turbina Eólica de Velocidade Variável

Relativamente ao modelo *Variable Speed Wind Turbine* (VSWT), este procura maximizar a extração de energia proveniente do vento. Em relação ao modelo CSWT, o VSWT apresenta uma produção de energia superior devido à sua flexibilidade no ajuste da velocidade de rotação com a velocidade do vento. A desvantagem do uso do modelo VSWT é a necessidade de retificadores, o que potencia o aumento de componentes no dimensionamento de um sistema, o que dificulta o controlo quer da frequência quer da tensão [27]. Na Figura 2.11 é possível observar um esquemático do modelo VSWT.

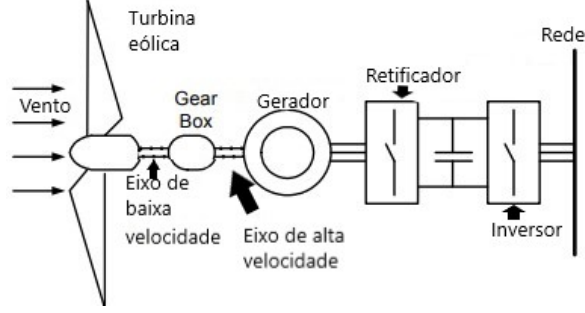


Figura 2.11: Estrutura geral do modelo VSWT.
(Adaptado de [28])

Ao analisar a Figura 2.11, é possível descrever o funcionamento do modelo VSWT. As pás capturam a energia do vento e giram o rotor. Este movimento é transmitido pelo eixo de baixa velocidade à transmissão (*gearbox*), que aumenta a velocidade de rotação e transfere-a para o eixo de alta velocidade. Posteriormente, liga-se ao gerador. O gerador converte a energia mecânica em energia AC, que é transformada em energia DC pelo retificador. Em seguida, o inversor converte a energia DC de volta para a energia AC com a frequência e tensão corretas para a rede, de modo a estarem todas em fase. Este processo garante a eficiente conversão e estabilização da energia eólica para uso na rede.

2.1.2.3 Distribuição do vento e potência disponível

A potência mecânica extraída através do vento pode ser calculada através da equação 2.3, onde ρ representa a densidade do ar, c_p o coeficiente de potência da turbina eólica, λ o rácio da velocidade de ponta, A_r a área varrida pelo rotor e v_w a velocidade ascendente do rotor [18], [26], [29], [30].

$$P_w = \frac{\rho_{ar}}{2} c_p(\lambda) A_r v_w^3 \quad (2.3)$$

O rácio da velocidade de ponta, λ , pode ser calculado através da relação entre a velocidade de ponta da pá da turbina, v_t , e a velocidade ascendente do rotor, v_w , sendo dada por:

$$\lambda = \frac{v_t}{v_w} \quad (2.4)$$

Por fim, o coeficiente de potência, c_p , é calculado através da seguinte equação:

$$c_p = 0.44 \left(\frac{125}{\lambda_i} - 6.94 \right) e^{-\frac{16.5}{\lambda_i}} \quad (2.5)$$

onde

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + 0.002} \quad (2.6)$$

Em diversas situações, a densidade de probabilidade de Weibull é utilizada para representar a disponibilidade de energia eólica numa dada região. Juntamente com a função de densidade de probabilidade de Weibull, a função de Rayleigh também é frequentemente aplicada e amplamente aceite em estudos sobre energia eólica. No entanto, a função de Rayleigh é apenas uma forma específica da função de densidade de probabilidade de Weibull. A função de Weibull é definida através da equação 2.7, onde k representa o fator de forma da lei de Weibull, c é o fator de escala da lei de Weibull e v_w representa a velocidade do vento [25], [30]–[33].

$$f(v_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v_w}{c} \right)^k \right) \quad (2.7)$$

A função de distribuição cumulativa da velocidade, v_w , dá-nos a fração de tempo (ou probabilidade) em que a velocidade do vento é igual ou inferior a v_w . Assim, a distribuição cumulativa $F(v_w)$ é o integral da função de densidade de probabilidade [25], [33], [34]:

$$F(v_w) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{v_w}{c} \right)^k \right) \quad (2.8)$$

Nas Figuras 2.12a e 2.12b é possível observar a relação entre a função de densidade $f(v_w)$ e a função de distribuição $F(v_w)$.

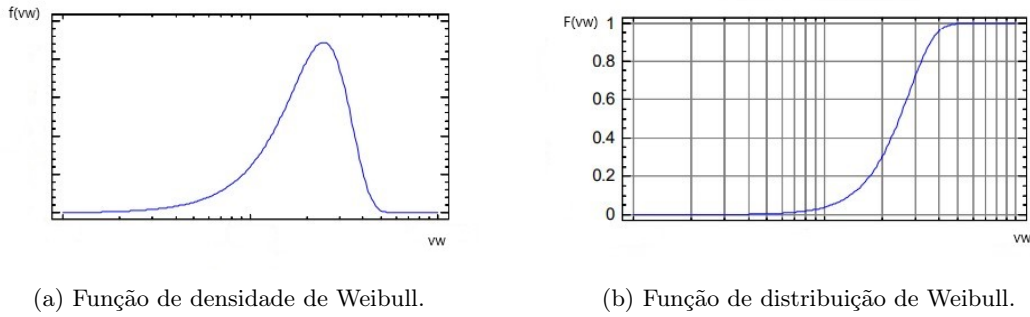


Figura 2.12: Relação geral entre a função de densidade e a função de distribuição.
(Adaptado de [35])

2.1.3 Energia Hidráulica

A energia hidráulica, também denominada de energia hídrica, é uma fonte de energia renovável disponível e frequentemente utilizada. Baseia-se num processo simples, onde se utiliza o movimento da água para gerar eletricidade. A corrente de água que passa pelas turbinas hidráulicas produz energia cinética que é inicialmente convertida em energia mecânica e, por meio de um gerador, transformada em energia elétrica [36].

Existem diferentes tipos de centrais hidroelétricas, sendo a barragem a mais conhecida, com capacidade para armazenar grandes volumes de água e controlar o fluxo. Também existe a barragem a fio de água, sendo esta apropriada para aproveitar a força da corrente natural dos rios. A principal diferença entre estes dois conceitos é a inexistência de um reservatório de armazenamento de água no segundo modelo, ou, se existente, é muito reduzido [37].

Contrariamente à energia eólica, a energia hidráulica oferece uma maior estabilidade no fornecimento de energia elétrica. Isto deve-se à ininterruptão da corrente de água, que gera uma força mais forte ou mais fraca, mas constante, permitindo ao sistema de energia hidráulica sustentar os sistemas elétricos. No entanto, as construções destas centrais podem impactar negativamente ecossistemas locais, forçando a realocação de comunidades e alterações nos padrões de fluxo dos rios [38].

2.1.3.1 Especificações de uma turbina hidráulica

Existem três tipos de turbinas hidroelétricas: a turbina Francis, a turbina Pelton e a turbina Kaplan. São utilizadas consoante o volume de água e as necessidades do sistema de obtenção de energia. Todas as turbinas compartilham a mesma essência, sendo compostas por uma parte fixa, denominada de estator, e pela roda ou impulsor [39]. A Figura 2.13 ilustra os três exemplos de turbinas apresentadas anteriormente.



Figura 2.13: Turbinas hidroelétricas Francis, Pelton e Kaplan.
(Retirado de [39])

Como se pode observar nas Figuras 2.14, quando o módulo turbina-gerador é iniciado, a água do reservatório flui para o túnel e depois para uma conduta. A água da conduta de descarga flui para um invólucro espiral que a distribui uniformemente nas pás do rotor, montadas no eixo comum com o gerador. O resultado assenta na conversão eletromecânica de energia. A conduta é operada através do regulador para regular o fluxo em função da potência elétrica variável. O fecho repentino das condutas leva à formação de uma onda de pressão que se move em ascendência na conduta de descarga e ao aumento da pressão na entrada da turbina. A ocorrência da onda de pressão deve-se às propriedades de elasticidade da parede da conduta e da compressibilidade da água [40].

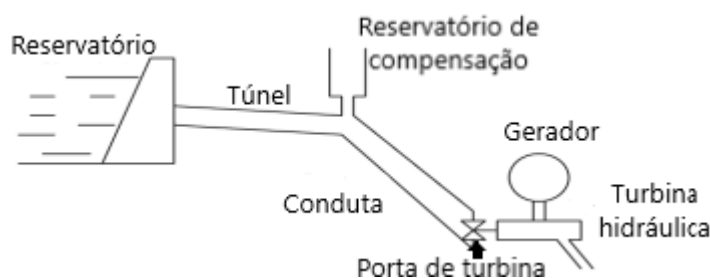
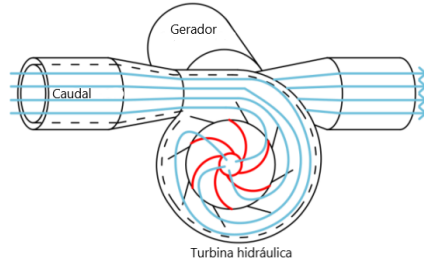


Figura 2.14: Planta geral de uma central hidráulica.
(Adaptado de [40])

Nos sistemas de energia hídrica, os tubos podem ser divididos por duas conceções diferentes [41]:

- Sistemas externos - em que o rotor está contido numa conduta secundária que contorna a conduta principal (Figura 2.15);
- Sistemas internos - em que o rotor está totalmente dentro da secção do tubo e apenas o gerador sobressai da conduta (Figura 2.16).

Os sistemas externos não dependem tão estritamente do tamanho do tubo, uma vez que o rotor está fechado numa conduta própria e permitem uma flexibilidade ainda maior. A sua principal desvantagem é a necessidade de espaços maiores para acomodar o conjunto no seu todo, tornando-os menos ideais para infraestruturas já existentes [41].



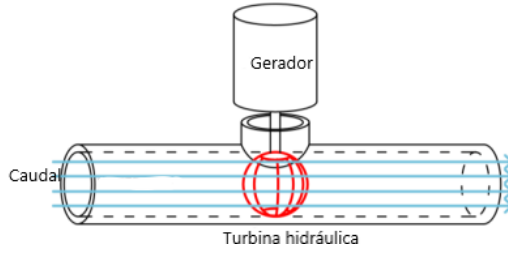
(a) Sistema externo.



(b) Leviathan Benkatina OG2.

Figura 2.15: Sistema externo e respetivo exemplo.
(Adaptado de [41])

Os sistemas internos têm a vantagem de serem mais compactos, o que os torna mais adequados, mas não restrito, para aplicações mais pequenas. A potência de saída varia entre 5 a 10 W, suficiente para alimentar sistemas com um menor consumo de energia, até 100 kW para estruturas com um maior gasto de energia [41].



(a) Sistema interno.



(b) Hydro-Coil 600.

Figura 2.16: Sistema interno e respetivo exemplo.
(Adaptado de [41])

2.1.3.2 Produção de Energia

A produção de energia através das turbinas hidráulicas depende do caudal, da densidade e do nível da água [42]. A potência pode ser calculada pela seguinte equação:

$$P_h = \rho_{\text{água}} g Q \Delta h \eta \quad (2.9)$$

onde $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água, com $\rho_{\text{água}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$, g é a aceleração gravítica, em que $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Quanto às variáveis, Q é o fluxo do caudal, Δh é a diferença de cotas entre o nível da água na entrada da barragem e na saída da turbina hidráulica e, por fim, η é a eficiência das turbinas.

Para avaliar o quanto uma turbina hidráulica é capaz de produzir, representa-se um gráfico onde se pode analisar a potência de saída da turbina em função do caudal ou da velocidade da água que incide nas pás da turbina hidráulica. Na Figura 2.17, pode-se observar um exemplo.

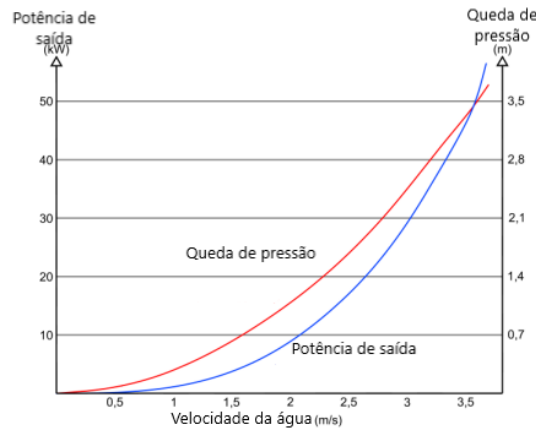


Figura 2.17: Gráfico de potência de saída/queda de pressão.
(Adaptado de [41])

2.2 Componentes Complementares do Gerador Híbrido

Além da utilização dos painéis solares e turbinas eólicas, existem outros componentes que são cruciais para o correto funcionamento do gerador híbrido tais como inversor solar, inversor eólico, controlador híbrido, cabos e dispositivos de proteção.

2.2.1 Inversores

Os inversores são componentes fundamentais em sistemas de ER que fazem a ligação entre as energias solar e eólica produzidas e a carga a alimentar, desempenhando um papel crucial na integração das fontes de energia solar e eólica com as cargas a serem alimentadas. A principal função dos inversores é converter a energia DC, gerada por fontes renováveis, em energia AC, que é utilizada na maioria dos sistemas elétricos. Para garantir a eficiência e estabilidade do sistema, a energia AC produzida pelos inversores deve estar em sincronia com todas as outras fontes de energia conectadas ao sistema. Isso significa que a saída do inversor de energia solar deve ter a mesma tensão alternada que a saída do inversor de energia eólica e que a tensão alternada do gerador a gásóleo. Além disso, os inversores devem operar na mesma frequência, onde, na maioria dos países, é padronizada em 50 Hz.

Os inversores podem ser categorizados em inversores solares e inversores eólicos. No caso dos inversores solares, para otimizar a potência de saída, o inversor deve operar próximo do ponto de potência máxima dos painéis fotovoltaicos, denominado de *Maximum Power Point* (MPP). Para assegurar o funcionamento ideal do inversor, é incorporado um dispositivo responsável pelo rastreamento deste ponto, conhecido como *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) [43]. O MPPT consiste num conversor DC em série com o inversor, que ajusta a tensão de forma a aproximar-se do ponto ideal de operação. Estes sistemas de inversores solares podem possuir múltiplas entradas, contudo é necessário que todas as entradas sejam compatíveis relativamente aos níveis de tensão e potência [16].

Em relação aos inversores eólicos, estes têm a função de converter energia DC em AC de forma sincronizada e em fase com a rede ou com qualquer outra fonte de energia disponível. Tal como os inversores solares, os inversores eólicos utilizam igualmente o MPPT para garantir o correto funcionamento do inversor. No caso dos inversores utilizados em turbinas eólicas de velocidade constante, como o modelo *CSWT*, o funcionamento é relativamente mais simples. Este modelo mantém uma velocidade de rotação constante, independentemente da velocidade do vento, resultando numa maior estabilidade da frequência e tensão geradas. Por outro lado, nos modelos *VSWT* é comum o uso de um retificador que converte a energia AC em DC. Esta conversão tem o intuito de facilitar o controlo da frequência e da tensão, eliminando variações indesejadas.

2.2.2 Controlador Híbrido

Para maximizar a eficiência e o aproveitamento da energia produzida a partir de diversas fontes, é fundamental implementar um controlador híbrido. Este dispositivo é responsável pela gestão da energia gerada. O controlador híbrido tem a capacidade de integrar múltiplas fontes de energia (solar, eólica, hidráulica, gerador a gás/óleo), ajustando a sua própria utilização consoante as preferências do utilizador e as condições do sistema [44].

2.2.3 Cabos

A cablagem do gerador híbrido inclui os cabos de ligação em série entre os módulos/painéis fotovoltaicos e as turbinas eólicas, bem como o cabo principal DC, que conecta várias séries de módulos e turbinas aos respetivos inversores. Esses cabos são concebidos para resistir a condições climáticas adversas, a temperaturas elevadas e à radiação UV.

Os cabos que conectam os módulos em série têm uma secção transversal que varia entre 1,5 mm² e 6 mm². A ligação entre os módulos e as turbinas é realizada por um condutor positivo, com isolamento vermelho, e respetivos terminais, e por um condutor negativo, com isolamento preto, e respetivos terminais. Estes cabos de ligação em série utilizam conectores MC4. A alimentação principal em DC pode ser realizada por um cabo de dois condutores ou por dois condutores individuais. Os cabos de cobre são frequentemente utilizados para estas aplicações devido à sua melhor condutividade [45].

Relativamente à parte AC, o cabo conecta a saída do inversor ao quadro principal da infraestrutura a ser alimentada. O número de condutores por cabo é determinado pela tipologia da carga a ser alimentada, o que significa que, no caso de uma carga monofásica, é necessário um inversor de saída monofásica, e o cabo deverá ser constituído por dois condutores, além do condutor de proteção terra.

2.2.4 Dispositivos de proteção

Os dispositivos de proteção garantem a segurança do sistema contra falhas como curtos-circuitos e sobreaquecimento. Na parte DC do sistema, é essencial que cada série incorpore uma caixa contendo fusíveis, projetada para resistir a condições atmosféricas adversas. Quanto à parte AC, devem ser avaliadas as proteções AC conforme a carga a sustentar. Os inversores atuais já estão equipados com proteções que garantem o funcionamento adequado do sistema. No entanto, é fundamental avaliar cada caso individualmente para determinar a necessidade de proteções adicionais [46].

2.3 Sistemas de Contentores Militares

Os sistemas de contentores militares são infraestruturas utilizadas no armazenamento, transporte, instalação de equipamentos e alocação de pessoal.

O uso de sistemas de contentores militares pode exigir um grande empenho em relação à sistematização e uniformização dos procedimentos e informações logísticas, uma vez que as forças operam em áreas distantes das suas bases logísticas nacionais, visando garantir a autossustentação para o cumprimento bem-sucedido da missão [47].

As características destes sistemas modulares podem ser ajustadas para otimizar a sua adaptação a diversas missões e condições ambientais [48]. Estes podem ser destinados a alocação permanente ou temporária.

Na Figura 2.18, pode-se observar vários contentores militares de ocupação permanente operados na 11^a Força Nacional Destacada (FND) da Missão Multidimensional Integrada das Nações Unidas para a Estabilização da República Centro-Africana (MINUSCA).



Figura 2.18: 11^a FND na República Centro-Africana (RCA).
(Retirado de [49])

Na Figura 2.19, observa-se uma tenda de alocação temporária, semelhante a uma tenda de campanha.



Figura 2.19: Tenda de um *Relocatable Temporary Camps* (RTC).
(Retirado de [50])

Relativamente às suas características, os sistemas de contentores militares podem variar significativamente entre modelos extremamente robustos e modelos de carácter simplificado. Através da empresa *MCContainers* [51], foi possível obter informações sobre os modelos mais comuns de contentores militares nas missões da Organização das Nações Unidas (ONU) ou da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN). No exterior, os contentores são constituídos por aço ou contraplacado, enquanto no interior a sua composição pode variar entre bambu, contraplacado ou aço, estando a escolha dos materiais alicerçada à sua utilidade, atendendo às normas ISO mais relevantes (668, 830, 1161, 1496-1, 3874, 6346), CSC (*Container Security Convention*) e CCC (*Customs Convention on Containers*) [52]. A escolha dos materiais também é influenciada pela condutividade térmica e pela capacidade dos materiais em transmitir o calor com maior ou menor facilidade [53]. Na Tabela 2.1 pode-se observar as seguintes condutividades térmicas para os diferentes materiais.

Tabela 2.1: Condutividade térmica dos materiais.

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)
Aço	8,7 a 66 [54]
Bambu	0,20 a 0,35 [55]
Contraplacado	0,30 a 0,35 [56]

Os tamanhos padrão dos contentores militares são, por norma, de 10, 20 ou 40 pés. Existem contentores desmontáveis, sendo estes denominados de Contentores *Flat-Pack*, os quais auxiliam na simplificação da logística do transporte dos contentores militares.

Através do contacto da empresa *MCCContainers* [51], de forma a obter informações sobre os preços dos diferentes tipos de contentores, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Preços dos contentores [51].

Modelo	Preço (Milhares de €)
Contentor de 20 pés	2 a 5
Contentor - Bloco Sanitário	2 a 5,4
Contentor - Escritório	3 a 5

Os três modelos de contentores apresentados nas Figuras 2.20a, 2.20b e 2.20c relacionam-se com possíveis protótipos que podem ser aplicados numa FND. O contentor do primeiro modelo (a) pode ser utilizado para diversas finalidades, desde oficinas para o pessoal da manutenção até Armazenamento de Material de Guerra (AMG). O segundo modelo (b) tem como finalidade servir como instalações sanitárias que atendam às necessidades de higiene dos militares. Por fim, a conceção do terceiro modelo de contentor (c) visa ser suporte físico de uma Sala de Operações ou instalações da força.



(a) Contentor de 20 pés.



(b) Contentor - Bloco Sanitário.



(c) Contentor - Escritório.

Figura 2.20: Três modelos de contentores.
(Retirado de [51])

Ao longo das últimas décadas, Portugal tem desempenhado um papel perceptível em diversas missões no estrangeiro, ocupando várias posições que refletem o seu compromisso global. Desde os primeiros envolvimento em operações de apoio à manutenção da paz até aos esforços humanitários e colaborações diplomáticas, a presença de Portugal no cenário internacional tem sido bastante relevante.

Portugal tem vindo a desempenhar funções em diversos TO, embora o contingente pessoal numa parte significativa dos mesmos seja bastante limitado.

Os múltiplos TO nos quais Portugal esteve e está envolvido em grande escala abrangem diversas regiões do mundo, destacando a utilização de sistemas de contentores militares para suportar eficientemente as operações de Logística. Essas regiões são:

- Afeganistão (De 2002 a 2021) [57];
- Bósnia (De 1991 a 2012) [58];
- Eslováquia (De 2024 até à data) [59];
- Iraque (De 2004 a 2020) [60];
- Kosovo (De 1999 a 2018) [61];
- RCA (De 2016 até à data) [62];
- Roménia (De 2021 até à data) [63];

- Timor-Leste (De 1999 a 2004 [64] e posteriormente de 2006 a 2012 (Guarda Nacional Republicana (GNR)) [65]).

Analisando o clima das áreas referidas, torna-se evidente que Portugal apresentou TO nos quais o clima não se caracterizava de forma uniforme. Desde condições climáticas extremamente quentes às de natureza muito fria, a logística de uma FND requer adaptações consideráveis devido às distintas adversidades meteorológicas presentes nas diversas regiões.

3 Estado da Arte

O presente capítulo tem como propósito a exposição de diversos estudos conduzidos no âmbito da aplicação de ER em sistemas de contentores militares, com especial enfoque na implementação de sistemas híbridos de energia destinados a contentores militares.

3.1 Estudo 1 - *A Smart Hybrid Energy System Grid for Energy Efficiency in Remote Areas for the Army*

Um sistema híbrido de energia é uma abordagem inovadora que combina fontes de ER com recursos naturais não renováveis, nomeadamente os combustíveis fósseis [50], [66]. Adaptar um sistema de energia de modo a integrar energias renováveis e não renováveis traz benefícios significativos, tais como a redução da dependência de redes elétricas locais, diminuição dos custos de energia, redução da emissão de gases com efeito de estufa e a garantia permanente do fornecimento de energia. Os autores de [50] denominam esta abordagem como *Smart Hybrid Energy System* (SHES). O SHES é um sistema que utiliza mais do que uma fonte primária de energia, seja renovável ou não, de forma a produzir e fornecer energia elétrica. Este sistema combina os geradores a gasóleo já existentes com a produção de energia solar, sistemas de baterias para armazenamento de energia e diversas tecnologias de recuperação de calor. A interligação dos elementos referidos forma uma rede elétrica autónoma e única que permite ao sistema gerar a sua própria energia - microrrede. Desta forma, a microrrede visa salvaguardar o fornecimento constante de energia elétrica e de água quente. Os seus elementos integram-se num sistema de gestão de energia que prioriza a produção de energia e a alternância entre os diferentes geradores de energia. Assim, o SHES permite que os pontos fracos de uma fonte sejam minimizados ou complementados pelos pontos fortes de uma outra fonte.

Para uma perceção visual deste sistema avançado, é possível examinar a sua estrutura na representação gráfica presente na Figura 3.1.

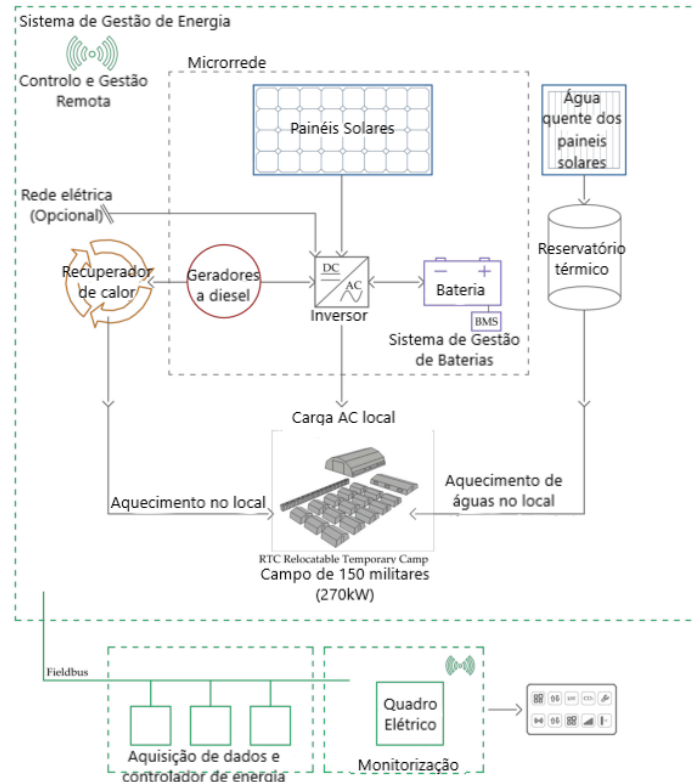


Figura 3.1: Arquitetura do SHES.
(Adaptado de [50])

O teste do SHES foi iniciado considerando um tempo de vida útil do projeto de 25 anos. Os autores desenvolveram um modelo energético para um campo militar composto por 150 militares, em diferentes climas, desde extremamente quente a extremamente frio, incluindo:

- *Brandon*, Canadá;
- *Vancouver*, Canadá;
- *Kanoya*, Japão;
- *Churchill*, Canadá;
- *Changi*, Singapura.

Na Tabela 3.1, são apresentadas inclinações ótimas dos painéis solares para alcançar um rendimento superior em cada um dos locais suprarreferidos.

Tabela 3.1: Inclinações otimizadas nas diferentes cidades.

Cidade	Ângulo Ótimo
<i>Bradon</i> , Canadá	-
<i>Vancouver</i> , Canadá	33°
<i>Kanoya</i> , Japão	24°
<i>Churchill</i> , Canadá	55°
<i>Changi</i> , Singapura	0°

Cada painel fotovoltaico, utilizados para cálculos, possui um pico de desempenho de 345 W e uma eficiência das células solares de 21.5 % (*SPR-X21-345*) [67] e a área total dos painéis é de 446 m². A Figura 3.2 detalha o sistema *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC) e o gerador de energia que alimenta o RTC.

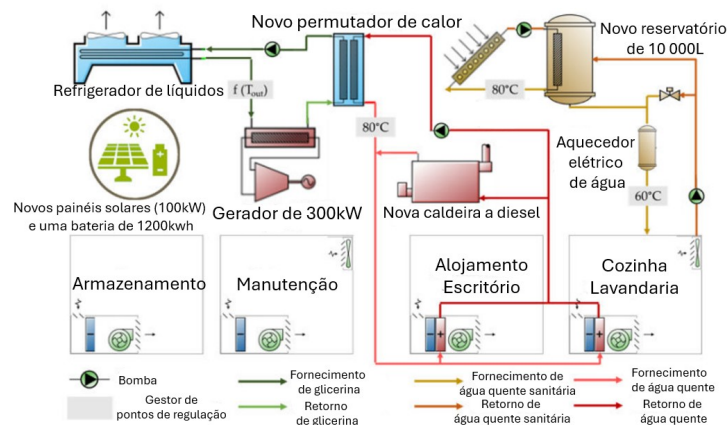


Figura 3.2: SHES: Esquema detalhado do HVAC e gerador do RTC.
(Adaptado de [50])

Utilizando os *softwares Energy Plus* e *HOMER Pro*, em conjunto com dados relativos à geometria, construção, disposição, HVAC, iluminação, equipamentos, operação, condições climáticas e sistema de gestão de energia, foram obtidos os resultados das emissões anuais de CO₂ apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultados das emissões anuais de CO₂ em diferentes climas.

Cidade	Tecnologia	Emissões de CO ₂ kg/ano
Brandon, Canadá	Sem modificações	919,500
	SHES	583,270 (- 37 %)
Vancouver, Canadá	Sem modificações	788,879
	SHES	517,335 (- 35 %)
Kanoya, Japão	Sem modificações	831,462
	SHES	606,460 (- 27 %)
Churchill, Canadá	Sem modificações	1036,790
	SHES	636,805 (- 39 %)
Changi, Singapura	Sem modificações	938,783
	SHES	743,139 (- 21 %)

Os autores de [50] concluíram que a combinação de microrredes inteligentes com energias renováveis pode reduzir significativamente o consumo de combustíveis fósseis e, por consequente, as emissões de CO₂. As simulações indicaram uma redução de até 37 % no consumo de combustíveis fósseis e nas emissões anuais de CO₂. Estas reduções variam entre 21% e 39% em ambientes extremamente frios e quentes, quando a inclinação dos painéis solares é otimizada.

3.2 Estudo 2 - *Performance Analysis of a Solar-Powered Multi-Purpose Supply Container*

No estudo de [68], os autores analisaram um contentor de uso múltiplo alimentado pela energia solar, destinado a disponibilizar serviços essenciais como refrigeração, higiene pessoal, módulo de primeiros socorros e produção de água potável em áreas de emergência social. A exigência energética para esses serviços é comparada à produção diária média do painel solar, abrangendo cinco localizações geográficas classificadas segundo a classificação climática *Köppen-Geiger*. Este sistema está equipado com uma ou mais baterias para armazenar energia excedente ou certificar que os serviços oferecidos pelo contentor continuem a funcionar caso a energia solar seja insuficiente.

Na Figura 3.3 verifica-se uma visão geral das diversas aplicações do contentor.

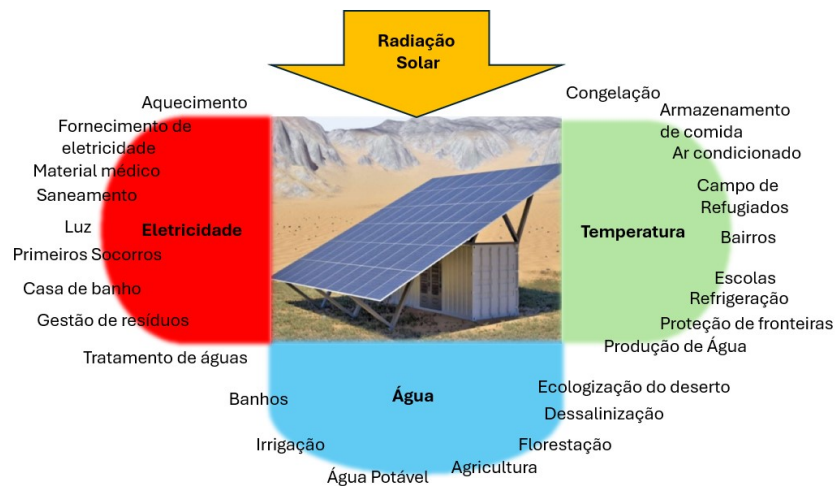


Figura 3.3: Interface e aplicações do contentor de abastecimento.
(Adaptado de [68])

A instalação do painel solar sobre o contentor visa não só protegê-lo contra intempéries, de forma a diminuir a sua degradação, mas também aproveitar o espaço disponível no terreno. O artigo [68] aborda um contexto militar, tendo como principal referência o estudo apresentado em [69]. Neste último, a energia exigida para os mesmos serviços descritos no artigo [68] foi calculada em cinco cidades diferentes:

- *Colonia*, Uruguai;
- Djibouti;
- *Port-au-Prince*, Haiti;
- *Puerto Williams*, Chile;
- *Yakutsk*, Rússia.

Para os cálculos, considerou-se, para cada painel da Figura 3.3, um pico de desempenho de 320 W, uma eficiência das células solares de 18,3%, e dimensões (Comprimento x Largura x Altura) de 1,716m x 1,023m x 0,035m, resultando numa área total de 1,755 m² [70]. No topo do contentor, foram instalados aproximadamente 40 módulos numa matriz de 5 linhas, cada uma composta por 8 módulos, correspondendo a uma ocupação total de 70,2 m².

Na Figura 3.4, observa-se o funcionamento do circuito elétrico dos painéis solares desempenhando o papel de geradores de energia.

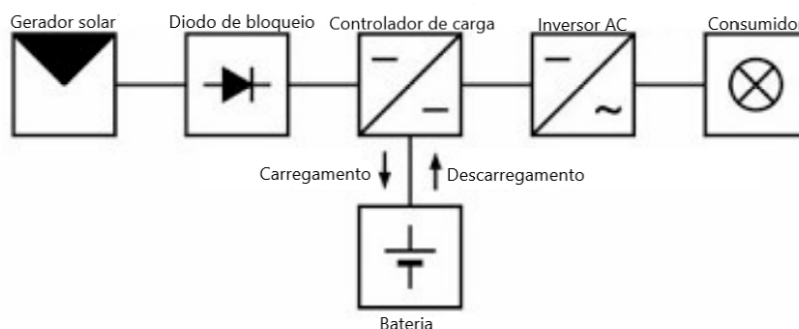


Figura 3.4: Circuito básico que alimenta o contentor.
(Adaptado de [68])

Através do *software RETScreen* e considerando uma inclinação ótima dos painéis solares, bem como os riscos associados a catástrofes naturais, foram obtidos resultados que indicam se as necessidades nos diversos serviços foram ou não satisfeitas nas distintas cidades.

Tabela 3.3: Resultados da produção de energia.

Cidade	Primeiros Socorros	Duche	Refrigeração	Congelamento	Média diária de água dessalinizada (m ³)
<i>Colônia</i>	Satisfez	Satisfez	Satisfez	Satisfez	12,5
Djibouti	Satisfez	Satisfez	Satisfez	Satisfez	14,9
<i>Port-au-Prince</i>	Satisfez	Satisfez	Satisfez	Satisfez	14,0
<i>Puerto Williams</i>	Não satisfez	Não satisfez	Satisfez	Não satisfez	7,7
<i>Yakutsk</i>	Não satisfez	Não satisfez	Satisfez	Satisfez	10,3

Os resultados, apresentados na Tabela 3.3, indicam que nas localidades de latitude média, *Colônia*, Djibouti e *Port-au-Prince*, o contentor pode operar em todos os serviços, através de energia solar. Além disso, possui a capacidade de produzir até 15 m³ de água dessalinizada por dia para irrigação. Para localidades com radiação solar relativamente reduzida, como *Yakutsk* e *Puerto Williams*, devem ser exploradas outras fontes energéticas, como eólica, hidráulica ou geotérmica.

Em suma, os autores [68] demonstraram que os contentores podem ser convertidos em unidades de abastecimento, combinando o fornecimento de serviços básicos com um transporte eficiente, mesmo em condições de infraestrutura inadequada.

3.3 Estudo 3 - *Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind/PV Systems*

No estudo [71], os autores apresentam os resultados de investigação sobre a aplicação de sistemas de geração de energia eólica, sistemas de geração de energia solar e sistemas de geração de energia solar e eólica em simultâneo. Foi desenvolvido um algoritmo simples para o dimensionamento dos sistemas. Este algoritmo foi utilizado para determinar a capacidade de produção ótima e o armazenamento necessário

para um sistema autónomo eólico, fotovoltaico e híbrido (eólico e fotovoltaico) num local experimental numa zona remota de *Montana* com uma carga do tipo residencial (entre 1 a 3 kWh). A produção de energia e o armazenamento para cada sistema são corretamente dimensionadas de modo a satisfazer a carga anual e minimizar o custo total anual. Além disso, foi efetuada uma análise económica para os três cenários acima referidos.

Os autores de [71] propuseram um sistema que integra a geração de energia eólica e solar. O diagrama de blocos que propõe esse sistema pode ser observado na Figura 3.5.

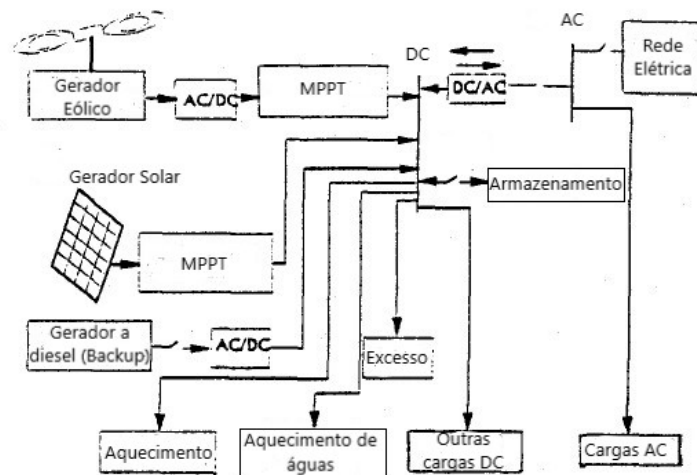


Figura 3.5: Sistema híbrido proposto.
(Adaptado de [71])

Esta configuração tanto pode ser utilizada para os sistemas de geração autónoma como para os sistemas ligados à rede elétrica. Para a configuração ligada à rede o gerador de reserva não é necessário, e para o sistema autónomo o interruptor que liga o barramento AC à unidade geradora está desligado. Neste caso, se a carga consumida for maior do que a soma da produção e do armazenamento, então a energia deve ser fornecida pelo gerador a gasóleo. Além disso, se a potência total gerada for maior do que a procura e o armazenamento estiver cheio, então o excesso de geração é descarregado para uma carga resistiva externa controlada por tensão. O objetivo da incorporação de uma carga descarregada no sistema é preservar a estabilidade da frequência e da tensão do sistema. Se a energia em excesso não puder ser dissipada de forma útil, deve ser eliminada sob a forma de calor por uma resistência controlada [72]. Os MPPTs manterão os geradores eólicos e fotovoltaicos a funcionar nos seus pontos de funcionamento de potência máxima.

O algoritmo desenvolvido e adotado para selecionar o tamanho da turbina eólica e o número de painéis fotovoltaicos necessários para um sistema autónomo satisfazer uma carga específica é o seguinte:

1. Seleciona tamanhos de unidades disponíveis no mercado para a turbina eólica, painel fotovoltaico e bateria.
2. Uma vez que a potência nominal da turbina eólica excede em larga escala a de um único painel fotovoltaico, mantém o número de turbinas (Kw) constante e aumenta o número de painéis fotovoltaicos (Ks) até que o sistema esteja equilibrado.
3. Repete o passo 2 para diferentes números de turbinas eólicas, por exemplo, K-0, 1, 2, 3 , etc., conforme necessário.

4. Calcula o custo anual total do sistema para cada combinação de Kw e Ks, que satisfaça os requisitos do passo 2.
5. Escolhe a combinação com o menor custo.

O perfil de carga horária média anual na região de *Montana* é representado na Figura 3.6.

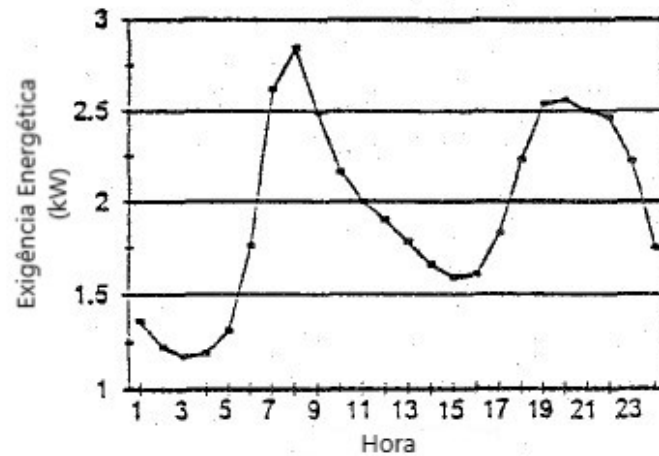


Figura 3.6: Exigência energética em média por hora.
(Adaptado de [71])

Estes dados são uma boa representação da exigência energética de uma casa residencial típica no Noroeste do Pacífico. A Figura 3.7 mostra os dados da velocidade média do vento por hora registrados durante dois anos.

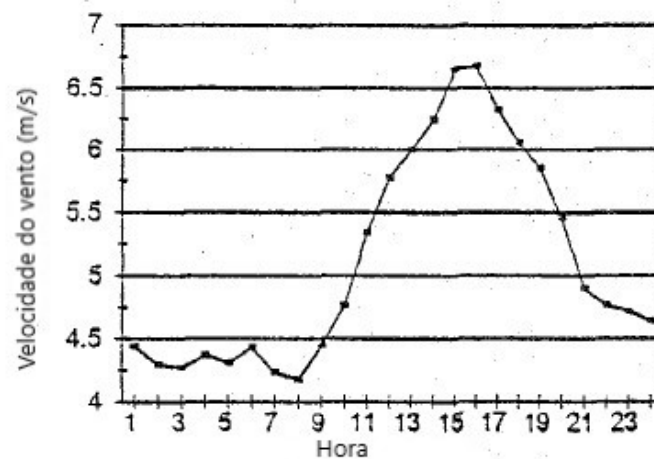


Figura 3.7: Velocidade do vento em média por hora.
(Adaptado de [71])

A Figura 3.8 mostra os dados da irradiância solar média por hora em *Montana*.

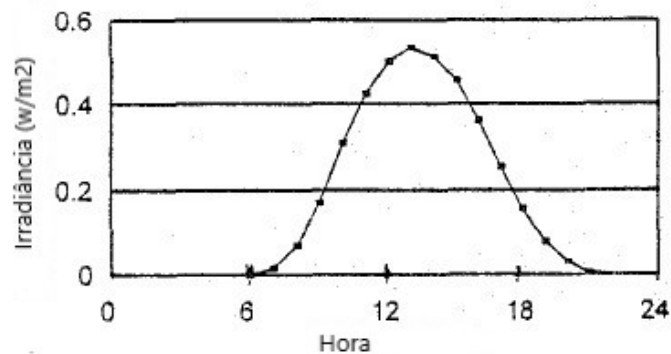


Figura 3.8: Irradiância média por hora.
(Adaptado de [71])

A classificação e o custo de capital dos componentes do sistema escolhidos para este estudo foram retirados de [73] e constam na Tabela 3.4. Além disso, foi considerado um gerador de reserva de 3,2 kW para utilização durante os períodos de tempo em que não haja vento suficiente nem energia proveniente do sol ou quando as baterias de armazenamento estiverem com pouca carga. O custo estimado para o gerador de reserva é de 2000\$. Além disso, foi utilizado um custo de manutenção de 2 centavos por kWh para a turbina eólica e de 0,5 centavos por kWh para o painel fotovoltaico.

Tabela 3.4: Preço e potência de cada componente do sistema.

Componente	Potência (kW)	Preço (\$)	Balanco do custo do sistema
Turbina eólica	10	20 000	25% do preço
Painel solar	0.053	350	50% do preço
Ciclo da bateria	0.21 / h	170	0

Através do algoritmo, foram calculadas as configurações para cada sistema. Na Tabela 3.5 é possível observar a lista de componentes necessários e o correspondente custo total anual para cada um.

Tabela 3.5: Configuração de cada sistema.

Configuração	Turbinas	Nº de painéis solares	Baterias	Custo total anual (Milhares de \$)
Apenas Energia Eólica	2-10 kW	0	9	5,574
Híbrido	1-10 kW	72	11	6,691
Apenas Energia Solar	0	158	16	8,677

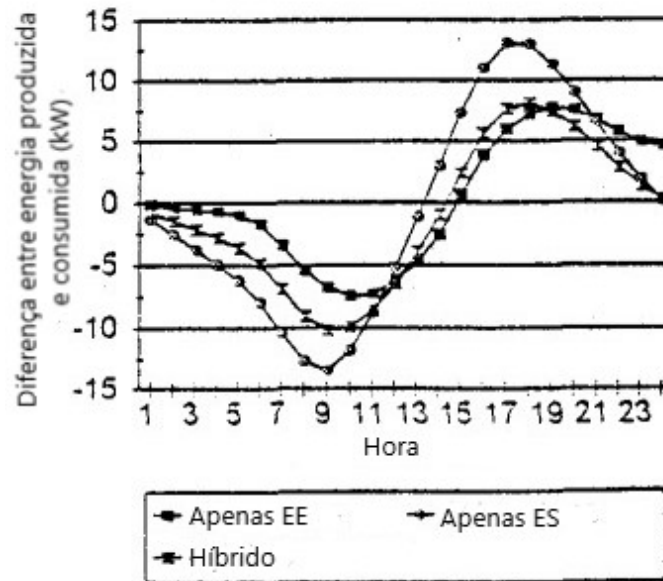


Figura 3.9: Diferença entre a energia produzida e consumida de cada sistema.
(Adaptado de [71])

Note-se nas curvas da Figura 3.9 que, para o sistema de energia solar e sistema híbrido, a energia é equilibrada durante 24 horas, o que significa que a produção corresponde à exigência. No entanto, para a configuração que utiliza apenas energia eólica, a média da curva de energia é positiva, o que significa que a produção excede a exigência. Relembrar que foi considerado um gerador a gásóleo de reserva para fornecer energia durante os períodos em que não há produção de energia renovável. Se o objetivo fosse implementar um sistema híbrido autônomo (sem um gerador *backup*) que possa fornecer energia sem interrupções, a capacidade de armazenamento da bateria teria de ser aumentada significativamente.

Em conclusão, os autores [71] estudaram a aplicação de sistemas de produção de energia eólica, energia solar e energia híbrida como sistemas de geração autônomos, para utilização ao nível residencial. Um algoritmo numérico simples, tendo em conta fatores económicos, foi desenvolvido para encontrar o tamanho ótimo dos componentes para as três configurações. Como exemplo, o algoritmo foi utilizado para encontrar a capacidade de produção, geração e armazenamento necessários para abastecer o perfil de carga média por hora de uma casa típica em *Montana*.

4 Metodologia

A dissertação tem como principal objetivo explorar as aplicações das ER em sistemas de contentores militares, apresentando uma abordagem inovadora e estratégica para maximizar a eficiência operacional e fomentar a sustentabilidade nas FNDs. Neste capítulo, serão apresentadas as metodologias utilizadas para garantir que o objetivo do trabalho seja alcançado. Serão descritas as diversas tarefas envolvidas no projeto, os passos a serem seguidos para o desenvolvimento de cada uma, bem como as ferramentas necessárias para a obtenção dos resultados.

4.1 Painéis Solares

As células solares que irão ser alvo de análise são as do 1M3P. O circuito equivalente deste modelo pode ser observado na Figura 4.1.

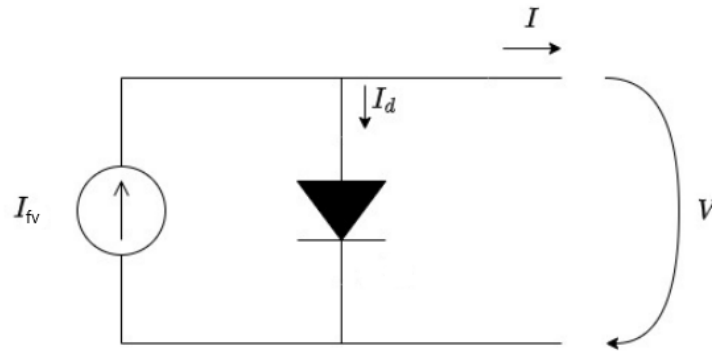


Figura 4.1: Circuito equivalente do 1M3P.
(Adaptado de [16])

Analisando o circuito equivalente do modelo em questão, aplicando a Lei de Kirchhoff, pode-se calcular a corrente de saída, I , em função da tensão de saída, V , através da seguinte equação [16], [17]:

$$I = I_{fv} - I_d \quad (4.1)$$

onde a corrente do díodo é dada por:

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V}{bV_T}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

sendo:

- I_{fv} a corrente fotovoltaica;

$$I_{fv} \approx I_{cc} \quad (4.3)$$

- b o fator de não idealidade do díodo;

$$b = \frac{V_{MPP} - V_{ca}}{V_T \ln \left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{cc}} \right)} \quad (4.4)$$

- I_o a corrente de saturação do díodo;

$$I_o = \frac{I_{cc}}{e^{\frac{V_{ca}}{bV_T}} - 1} \quad (4.5)$$

- V_T correspondente à tensão térmica que pode ser calculada através da equação 4.6, onde T é a temperatura, k a constante de Boltzmann e q o módulo da carga do eletrão:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (4.6)$$

Para calcular a potência de saída, P , é necessário multiplicar o valor de V , com o valor de I . Esta potência não está relacionada com a potência máxima (MPP) que a célula é capaz de produzir. O MPP corresponde ao momento em que a derivada parcial da potência P em ordem a V é nula.

Os fatores com maior influência no rendimento das células solares são a temperatura e a irradiância. De modo a analisar a sua preponderância, é fundamental assumir que [16]:

- O fator de não idealidade do díodo, b , mantém-se inalterado;
- A corrente de saturação do díodo, I_o , varia apenas com a temperatura, tal que:

$$I_o(T) = I_o^r \left(\frac{T}{T^r} \right) e^{\frac{E_g}{b} \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T(T)} \right)} \quad (4.7)$$

- A corrente fotovoltaica que é aproximadamente igual à corrente de curto-circuito, I_{cc} , varia apenas com a irradiância, G .

$$I_{cc} = \frac{G}{G^r} I_{cc}^r \quad (4.8)$$

Um painel fotovoltaico é constituído por z células, com m células em série e n células em paralelo. Considerando que todas as células do painel são iguais ao apresentarem um comportamento idêntico, a tensão, a corrente e a potência de saída do painel solar podem ser calculadas através das seguintes equações [16]:

$$V^{Painel} = m \cdot V^{Célula} \quad (4.9)$$

$$I^{Painel} = n \cdot I^{Célula} \quad (4.10)$$

$$P^{Painel} = z \cdot V^{Célula} = (m \cdot n) \cdot P^{Célula} \quad (4.11)$$

4.2 Turbinas Eólicas

Serão explorados dois tipos de turbinas eólicas: de eixo vertical e de eixo horizontal. Será necessário analisar as vantagens de cada modelo, considerando diversos fatores, tais como:

- Potência Nominal;
- Orientação do eixo;
- Área varrida, A_r ;
- Velocidade do vento na qual a turbina é operacional;
- Eficiência da turbina, η_{te} ;
- Coeficiente de potência, c_p .

É importante relembrar que a recolha dos dados destes parâmetros é crucial, uma vez que estes afetam diretamente a produção de energia eólica. A potência total extraída através da turbina eólica pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$P_t = P_w \cdot \eta_{te} \quad (4.12)$$

Relembrando a equação 2.3:

$$P_w = \frac{\rho_{ar}}{2} c_p(\lambda) A_r v_w^3 \quad (4.13)$$

A Produção Anual de Energia (PAE) refere-se à totalidade da energia eólica convertida em eletricidade ao longo de um ano. A PAE de uma turbina pode ser determinada integrando a potência para cada cenário de vento registado durante um ano [74]. Este cálculo é realizado através da aplicação da curva de potência da turbina em combinação com a distribuição anual do vento.

$$PAE_t = T_{anual} \int_{\theta_0}^{\theta_{360}} \int_{v_{w0}}^{v_{w\infty}} P_w(v_w) f_{vw}(v_w) dv d\theta \quad (4.14)$$

onde:

- T_{anual} é a duração do ano em horas;
- θ é a direção do vento;
- v_{w0} é a velocidade mínima do vento;
- $v_{w\infty}$ é a velocidade máxima do vento.

Considerando que todas as turbinas eólicas apresentam um comportamento semelhante, a PAE total do sistema é a soma das PAEs individuais de cada turbina. Esta relação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$PAE_{total} = N_t \cdot PAE_t \quad (4.15)$$

em que N_t é o número total de turbinas eólicas.

De modo a maximizar o conjunto total das turbinas eólicas, é essencial minimizar os efeitos de turbulência conhecidos como *wake effects*, que resultam do *layout* e do posicionamento das turbinas. Trata-se de uma pequena interferência no fluxo do vento causada por uma turbina em relação à turbina anterior. Para reduzir estas perdas, a localização e a orientação das turbinas é um fator a considerar.

4.3 Análise do Terreno e Infraestrutura

Para garantir a eficiência e a adequação do sistema a implementar, a análise do terreno e das infraestruturas terá de ser realizada de forma rigorosa. Para tal, é necessário considerar as suas dimensões e localizações. Além disso, deve-se avaliar a irradiância disponível e a velocidade média do vento.

4.3.1 Análise Climatológica

A análise climatológica consiste no estudo detalhado das condições climáticas de uma determinada localização ao longo de um período específico. Esta análise pode abranger diversas variáveis, como temperatura, humidade, irradiância, velocidade do vento e pressão do ar, entre outras. O objetivo é identificar as tendências climáticas da região em estudo. Para este propósito, os dados sobre as condições atmosféricas serão obtidos através da ferramenta *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) [75] e do *software HOMER Pro* [76].

4.3.2 Dimensionamento da Carga

Para realizar o dimensionamento do sistema em causa, é necessário conhecer o valor do consumo médio mensal de uma FND. Esse valor irá ser inserido num algoritmo desenvolvido em *Python*. O algoritmo recolhe e processa os dados do consumo de modo a aplicar os cálculos necessários para o dimensionamento do sistema.

4.4 Dimensionamento do Sistema

A avaliação financeira de um sistema é uma etapa importante para a determinação da sua viabilidade económica, incluindo o Retorno sobre o Investimento (ROI) e o Prazo de Retorno do Investimento (PRI). Este processo envolve a análise dos custos e benefícios associados à implementação e operação do sistema, proporcionando uma visão clara sobre a sua eficiência e sustentabilidade financeira.

Para realizar esta avaliação, é essencial conhecer os preços dos componentes que irão integrar o gerador híbrido, os custos de manutenção e o potencial ganho financeiro que o sistema irá viabilizar resultante da poupança no consumo de combustíveis fósseis.

O ROI é uma métrica que relaciona os benefícios do investimento com os custos associados. O cálculo de ROI é dado pela seguinte equação [77]:

$$ROI = \frac{GFin - CFin}{CFin} \quad (4.16)$$

em que:

- $GFin$ representa os ganhos financeiros do projeto;
- $CFin$ representa os custos financeiros do projeto.

O PRI é um método que mede o tempo decorrido desde o início do investimento até ao momento em que o investimento é totalmente recuperado [78]. O PRI pode ser obtido utilizando a equação 4.17.

$$PRI = \frac{I_0}{GP} \quad (4.17)$$

em que:

- I_0 é o investimento inicial do projeto;
- GP é a receita anual.

O gerador híbrido incorpora múltiplas fontes de energia para otimizar a eficiência e a sustentabilidade do sistema. Utiliza painéis solares para capturar a energia solar, turbinas eólicas para aproveitar a energia do vento e um gerador a gásóleo como *backup*, garantindo um fornecimento contínuo de energia mesmo em condições adversas. Os componentes elétricos e eletrónicos podem ser alimentados por tensão AC ou tensão DC, dependendo das suas especificações e necessidades. No caso de dispositivos que requerem DC, a conversão da energia AC em DC é, geralmente, realizada pelos próprios componentes, dispensando a necessidade de inversores. No entanto, para o fornecimento de energia a cargas que utilizam AC, quando a fonte disponível é DC, é imprescindível o uso de inversores. Estes dispositivos são responsáveis pela conversão de tensão DC em tensão AC, possibilitando a operação adequada dos equipamentos que dependem deste tipo de alimentação. A composição do sistema pode ser consultada na Figura 4.2.

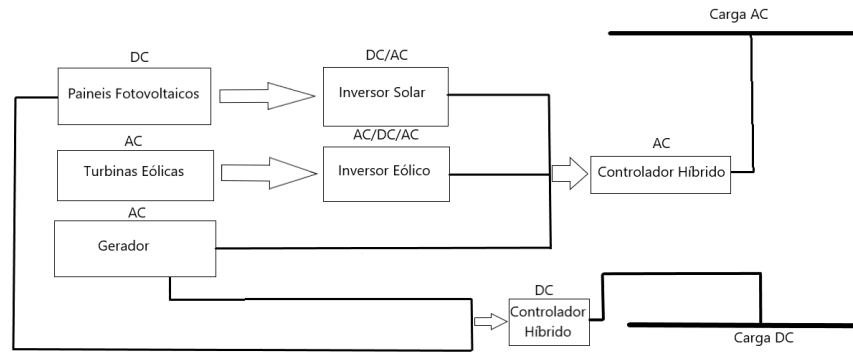


Figura 4.2: Configuração típica do gerador híbrido.
(Adaptado de [71])

Para determinar a solução mais eficiente e adequar as fontes de ER ao campo, foi desenvolvido um algoritmo que calcula a melhor configuração do projeto. O Algoritmo de Otimização (Algoritmo 1) é responsável por encontrar a solução ideal, podendo ser consultado no Anexo A. Este algoritmo, com base nos dados fornecidos pelo utilizador, utiliza funções para solicitar informações sobre o sistema a ser dimensionado, tais como:

- Exigência energética média por hora em KWh;
- Percentagem de energia solar (a percentagem de energia eólica é o complemento);
- Área ativa, potência máxima, eficiência e preço de cada painel solar;
- Potência máxima, área varrida, eficiência, coeficiente de potência e preço de cada turbina eólica;
- Preço e eficiência do inversor solar e do inversor eólico;
- Preço dos controladores híbridos.

Estes parâmetros são inseridos durante a execução do código. Os únicos parâmetros fixos, que podem ser alterados apenas diretamente no código, são as condições climatológicas da região em questão, o preço do gasóleo e o custo de manutenção anual do sistema. Na Figura 4.3 é possível observar o diagrama de blocos do Algoritmo 1 desenvolvido, ilustrando o processo de cálculo para o dimensionamento e a avaliação financeira do gerador híbrido.

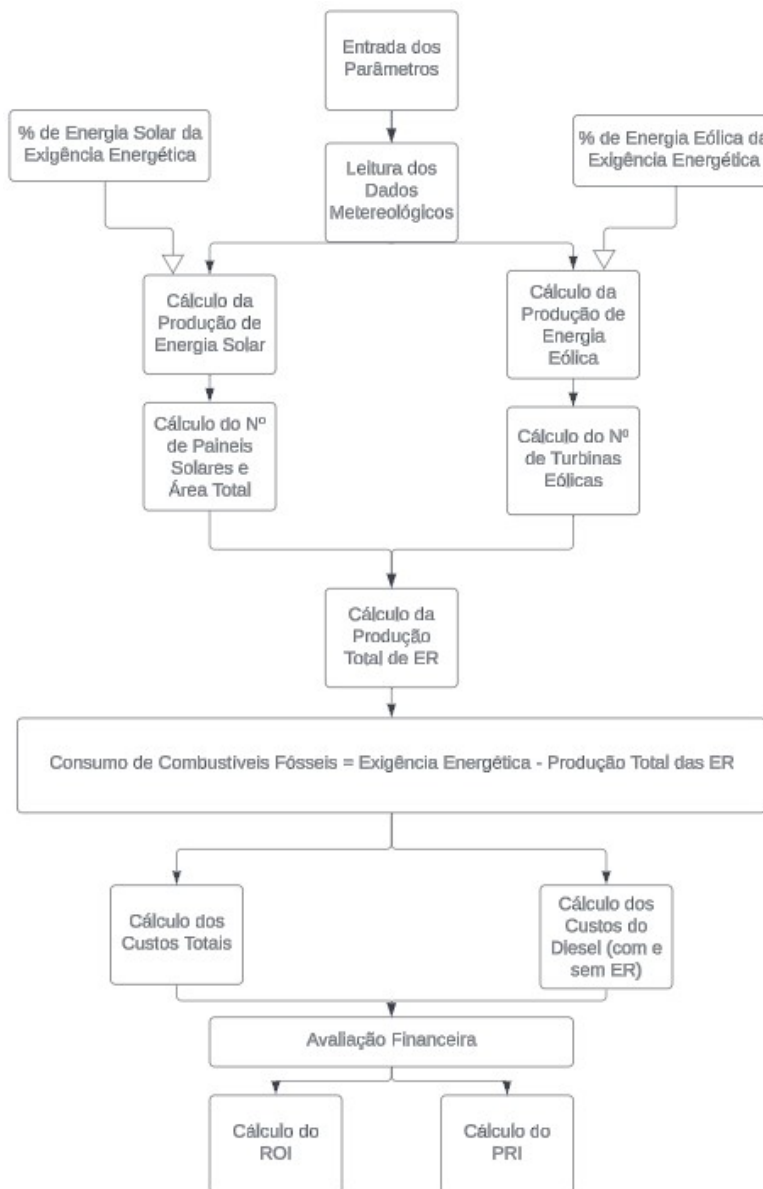


Figura 4.3: Lógica do dimensionamento manual do Algoritmo 1.

Através dos dados inseridos pelo utilizador, das condições climatológicas da região em estudo e das equações referidas anteriormente, vão ser calculados os seguintes resultados:

- Custo total de gasóleo por dia com e sem ER;
- Montante economizado em cada mês;
- Número total e área total dos painéis solares;
- Número total de turbinas eólicas;
- Custo inicial do investimento, I_0 ;
- Redução percentual do consumo de gasóleo;
- Montante economizado num ano;
- Retorno sobre o Investimento, ROI;

- Prazo de Retorno do Investimento, PRI.

Após obter os resultados, o algoritmo irá iterar sobre diferentes combinações de percentagens de energia solar e eólica, calculando para cada combinação o respetivo ROI. No final deste ciclo de iterações, a iteração que obtiver o maior ROI será a combinação escolhida. Em seguida, o algoritmo recalculará os resultados para confirmar a solução ótima. A Figura 4.4 ilustra o fluxograma que representa o momento da otimização do sistema.

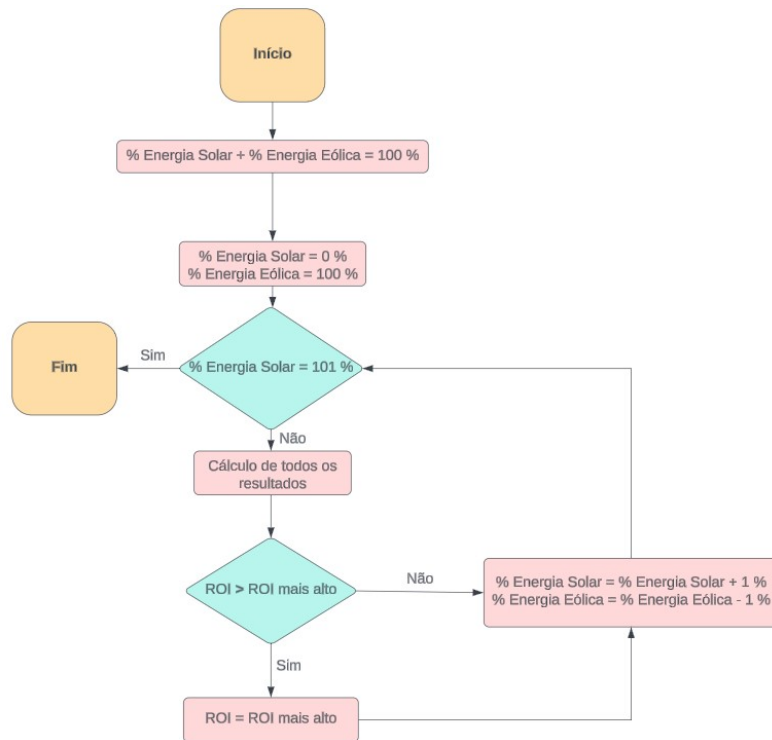


Figura 4.4: Lógica da otimização do sistema do Algoritmo 1.

5 Resultados

No presente capítulo serão demonstrados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho através da metodologia apresentada no capítulo anterior.

5.1 Painéis Solares

O painel solar considerado e disponível para o desenvolvimento deste projeto, é o modelo *SZ-100-33MF* [79] da empresa *SolarFam*. Este painel é constituído por silício monocristalino (mono-Si) e possui 33 células dispostas em série. Estas são otimizadas para condições de baixa irradiância e incluem díodos *bypass*, o que permite o funcionamento do painel mesmo em situações de sombreamento parcial, como quando está nublado ou ocorre outro tipo de obstrução, como a queda de folha ou a acumulação de poeiras.

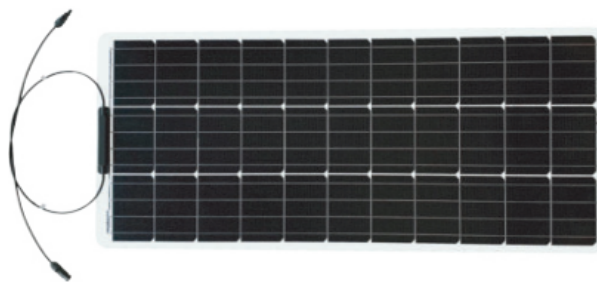
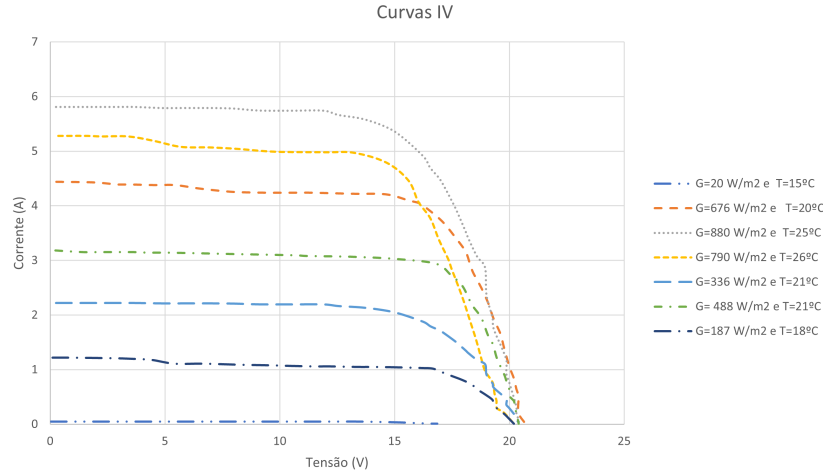
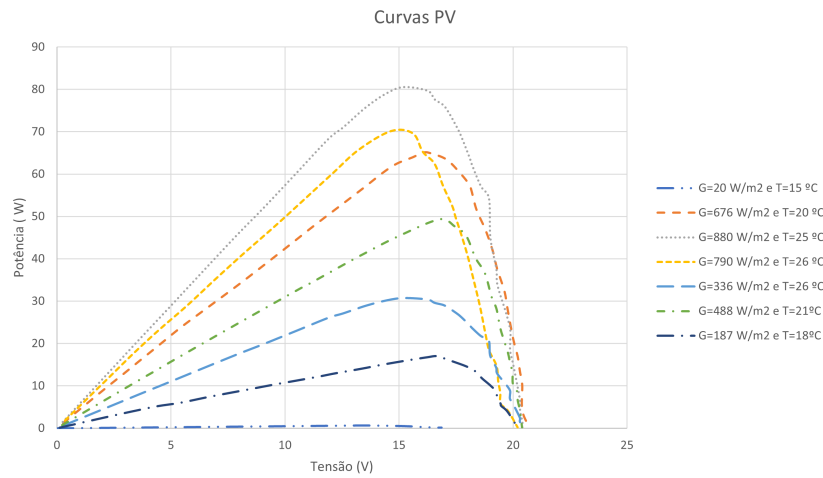


Figura 5.1: Painel solar *SZ-100-33MF*.
(Retirado de [79])

As curvas características do painel solar *SZ-100-33MF*, que demonstram o comportamento da tensão e corrente em função de diferentes níveis de irradiância e variações de temperatura, podem ser observadas na Figura 5.2. Estas curvas ilustram como a irradiância afeta diretamente a corrente gerada pelo painel, enquanto a temperatura influencia significativamente a tensão de saída. Com o aumento da irradiância, a corrente elétrica tende a aumentar, resultando numa maior produção de energia. Por outro lado, o aumento da temperatura geralmente reduz a tensão de circuito aberto, diminuindo a eficiência geral do painel. Essas características são cruciais para entender o desempenho do painel *SZ-100-33MF* em diferentes condições ambientais.



(a) Curvas I-V.



(b) Curvas P-V.

Figura 5.2: Curvas características do *SZ-100-33MF*.

Tabela 5.1: Parâmetros do painel solar *SZ-100-33MF* [79].

$A_{\text{ativa}} \text{ (m}^2\text{)}$	Nº de células	$I_{cc} \text{ (A)}$	$V_{ca} \text{ (V)}$	$P_{\text{m}á\text{x}} \text{ (W)}$	$\eta_{\text{cel}} \text{ (\%)}$	Preço (€)
0,564	33	6,51	19,70	100	19,27	236

5.2 Turbinas Eólicas

A turbina eólica escolhida para o dimensionamento do sistema foi a *Aeolos-V 10kW* [80]. Esta turbina foi selecionada por ser uma turbina de eixo vertical, o que elimina a necessidade de alinhar a turbina com a direção do vento. Devido ao seu *design* de eixo vertical, a turbina ocupa menos espaço, contribuindo significativamente para a otimização do espaço disponível. O modelo possui três lâminas de eixo vertical, cada uma com cerca de 5,5 metros de comprimento. Também possui um travão mecânico responsável por interromper o funcionamento da turbina em situações de manutenção da mesma ou quando a velocidade do vento excede os limites de segurança.

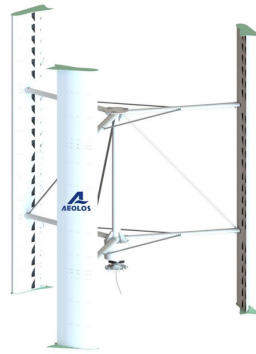


Figura 5.3: Turbina eólica *Aeolos-V 10kW*.
(Retirado de [80])

Esta turbina inicia o seu movimento a uma velocidade do vento relativamente baixa (1,5 m/s), o que a torna mais eficiente em locais onde a velocidade do vento é reduzida. Na Figura 5.4 pode-se observar a curva de potência da turbina eólica *Aeolos-V 10kW*, ilustrando o desempenho da turbina em diferentes velocidades do vento.

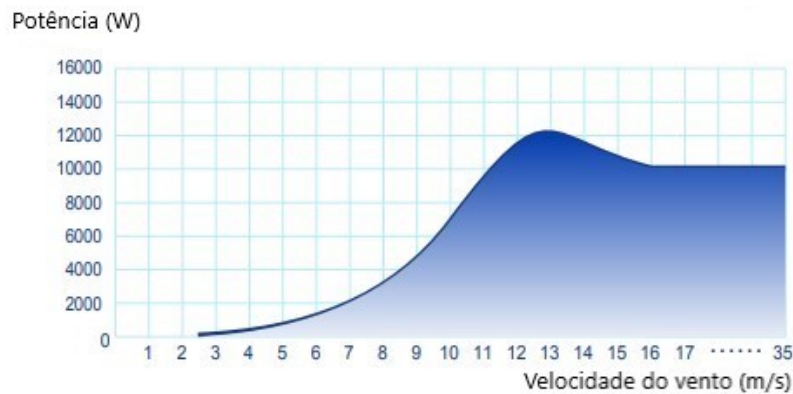


Figura 5.4: Curva de potência da turbina eólica *Aeolos-V 10kW*.
(Retirado de [80])

Tabela 5.2: Parâmetros da turbina eólica *Aeolos-V 10kW* [80].

P_w (kW)	A_r (m ²)	η_{te} (%)	C_p	Velocidade do vento de início (m/s)	Preço (Milhares de €)
10	151,18	96	0,24 [81]	2,5	15

5.3 Análise da Infraestrutura

O cenário em estudo localiza-se em Bangui, na República Centro-Africana. A escolha deste local deve-se ao facto de ser um Teatro de Operações ativo e pelo clima quente e húmido da sua região. Na Figura 5.5, é possível visualizar a vista aérea do campo.



Figura 5.5: Vista aérea do campo na RCA.

Com o auxílio da ferramenta PVGIS [75], foi possível determinar o ângulo e o azimute ótimos para a orientação dos painéis solares, maximizando o aproveitamento do gerador solar. O ângulo é de 7° e o azimute de 13° .

Através da ferramenta *Google Earth* [82], mediu-se a área dos contentores, de alguns telhados das infraestruturas do campo e de uma parte do campo onde poderão ser instaladas as turbinas eólicas. Estas medições possuem uma incerteza de 3,54% [83] e podem ser consultadas no Anexo B. A Figura 5.6 ilustra as áreas passíveis de instalação dos painéis solares e das turbinas eólicas.



Figura 5.6: Medição da área disponível para o gerador.

A área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos varia entre $6\,048\text{ m}^2$ e $6\,493\text{ m}^2$ a amarelo, e a azul, para a instalação das turbinas eólicas, está compreendida entre $1\,420\text{ m}^2$ e $1\,524\text{ m}^2$.

5.3.1 Análise Climatológica

Para a análise climática da RCA, foram recolhidas variáveis como a temperatura, a irradiância, a velocidade do vento e a humidade. Nas Figuras 5.7 e 5.8 é possível observar a temperatura e a irradiância

média diária em dois meses representativos de diferentes estações do ano (dezembro, durante o verão, e agosto, durante o inverno). Os dados para os restantes meses estão disponíveis no Anexo B.

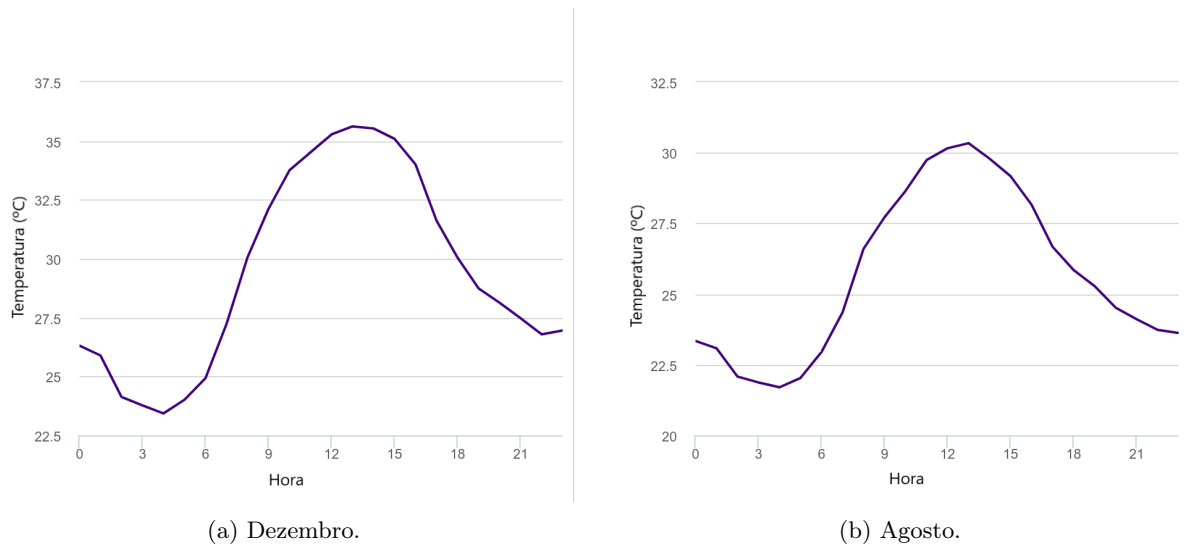


Figura 5.7: Temperatura média diária na RCA.

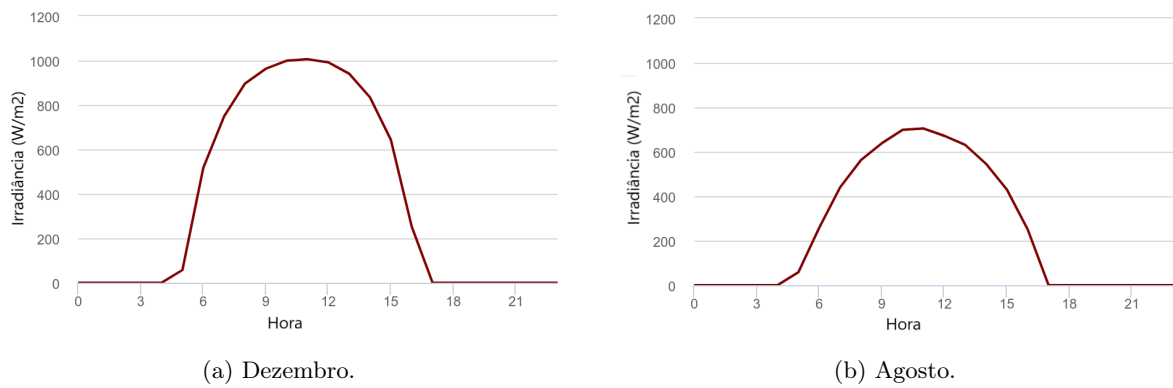


Figura 5.8: Irradiância média diária na RCA.

Para a análise da humidade e da velocidade do vento, foi utilizado um conjunto de dados recolhidos a cada hora entre os anos de 2005 e 2020 [75]. Nas Figuras 5.9 e 5.10 constam os dados referentes aos meses de dezembro e agosto. Os dados dos restantes meses podem ser observados no Anexo B.

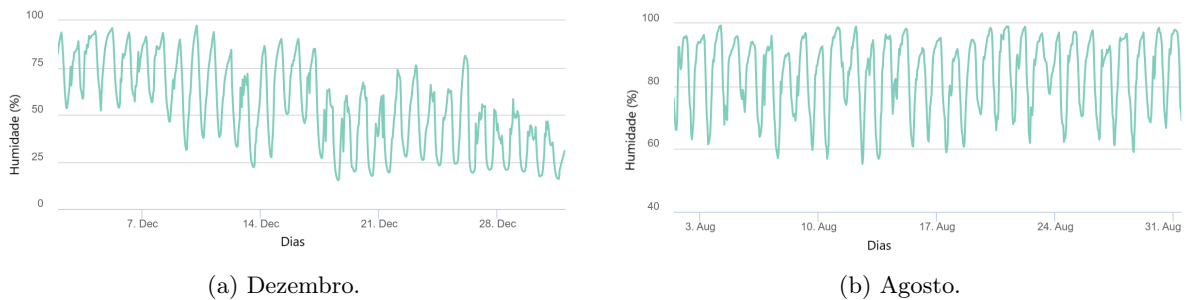


Figura 5.9: Humidade ao longo dos meses de dezembro e agosto na RCA.

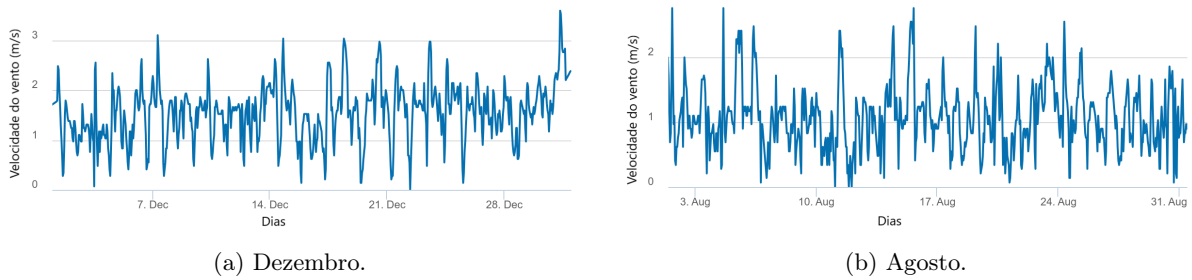


Figura 5.10: Velocidade do vento ao longo dos meses de dezembro e agosto na RCA.

5.3.2 Dimensionamento da Carga

O campo onde a força está alocada é composto por quatro geradores alimentados a gasóleo. No entanto, apenas dois estão em operação contínua (geradores externos), enquanto os restantes geradores servem de reserva (geradores internos) em caso de situações de falha ou necessidade de energia extra.

Na Tabela 5.3 é possível observar algumas especificações dos geradores disponíveis na RCA.

Tabela 5.3: Especificações dos geradores.

Tipo de Gerador	Potência Nominal (kVA/kW)	Fator de Potência	Frequência (Hz)	Eficiência (%)	Consumo (50%/75%/100%) (l/h)	Depósito (l)
Interno	60/48	0,8	50	92	7,1/10,2/13,6	124
Externo	500/400	0,8	50	94,4	48,8/71,7/99,5	990

Na Figura 5.11 é possível verificar o esquema elétrico do campo onde o consumo médio por hora é cerca de **110 kWh**, o que corresponde a um consumo médio diário de **2 640 kWh/dia**.

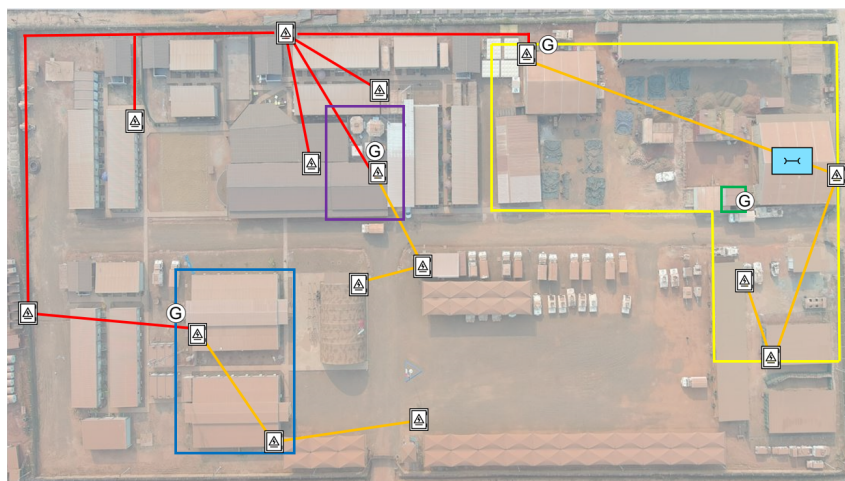


Figura 5.11: Esquema elétrico do campo na RCA.

Como o consumo energético é conhecido apenas de forma generalizada, sem dados exatos sobre variações ao longo do dia, atendendo ao estudo [84], foi ajustada a exigência energética conforme a hora, com base em percentagens superiores ou inferiores em relação ao consumo médio (110 kWh). O estudo [84] foi testado num campo militar com cerca de 150 militares. Este ajuste reflete a variação na exigência

de energia ao longo do dia, conhecida como perfil de carga. Durante os horários de pico, o consumo energético é mais elevado, enquanto em períodos de menor atividade, a exigência é inferior.

A Figura 5.12 apresenta o consumo médio por hora do campo na RCA, com base nas variações percentuais do estudo [84].

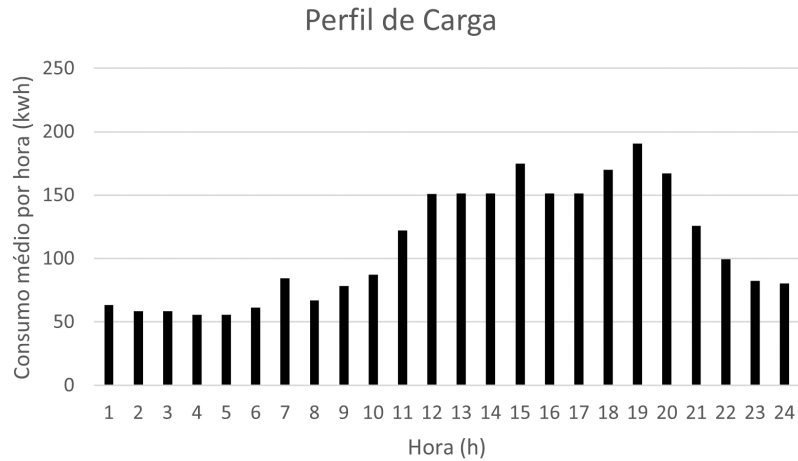


Figura 5.12: Consumo médio por hora.

5.4 Dimensionamento do Sistema

Com base nos parâmetros apresentados anteriormente e nos restantes valores indicados na Tabela 5.4, foi calculado o dimensionamento ótimo do sistema através do Algoritmo 1 que pode ser consultado no Anexo A. A manutenção anual do sistema corresponde a aproximadamente **1,5%** do I_0 , com base num projeto publicado pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) [85] e o preço do gasóleo por litro foi considerado **2€**. Os resultados obtidos estão presentes na Tabela 5.5.

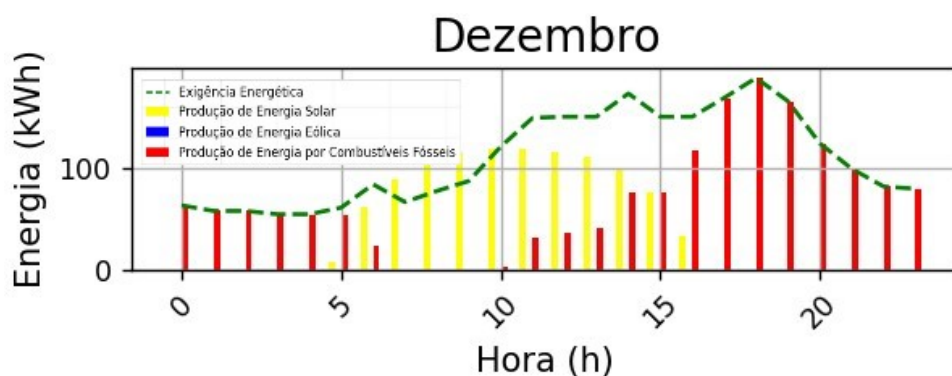
Tabela 5.4: Restantes parâmetros para o dimensionamento do gerador híbrido.

Eficiência máx. do inversor solar (%)	Preço do inversor solar (Milhares de €)	Eficiência máx. do inversor eólico (%)	Preço do inversor eólico (Milhares de €)	Preço dos controladores híbridos (Milhares de €)
98,5	7,25	94	3,5	7

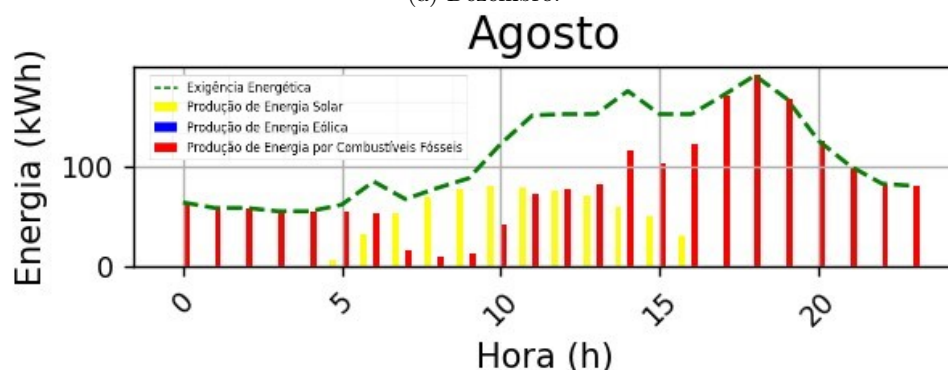
Tabela 5.5: Resultados do dimensionamento do gerador híbrido.

Energia solar (%)	100
Energia eólica (%)	0
Nº de painéis solares	1 100
Área total de painéis solares (m²)	621
Nº de turbinas eólicas	0
I_0(Milhares de €)	277,350
Redução do consumo de gasóleo anualmente (%)	31
Montante economizado anualmente (Milhares de €)	152,369
ROI máximo	378% em 10 anos
PRI mínimo	1 ano e 10 meses

Para esta configuração e localização em análise, foram elaboradas as curvas médias diárias de produção de energia do gerador híbrido. Estas curvas apresentam variações significativas devido às oscilações na irradiância solar incidente durante o dia nos painéis. Nas Figuras 5.13a e 5.13b, é possível observar as curvas de consumo-geração para os meses de dezembro e agosto. As curvas consumo-geração dos restantes meses do ano constam no Anexo B.



(a) Dezembro.



(b) Agosto.

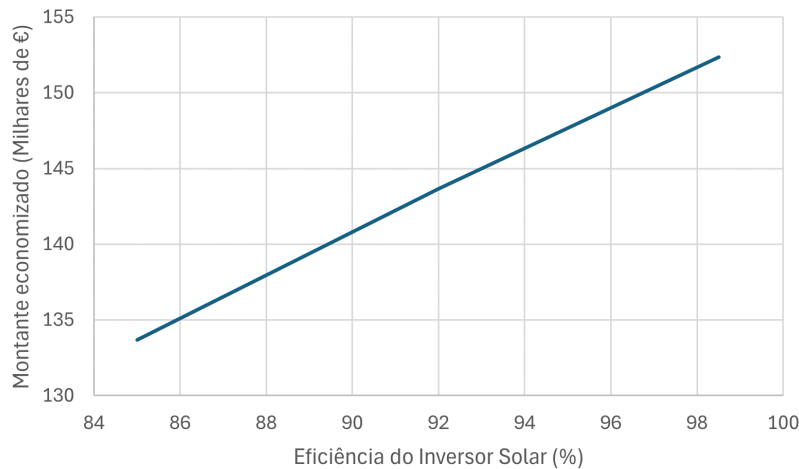
Figura 5.13: Curvas consumo-geração.

Devido às condições meteorológicas em Bangui e ao elevado investimento necessário, a implementação de turbinas eólicas na região não se apresenta como uma solução viável. As variáveis climáticas, como a velocidade e a consistência do vento, não satisfazem os requisitos mínimos para a operação eficiente e contínua das turbinas eólicas. Além disso, os custos associados à aquisição, instalação e manutenção destes equipamentos são consideravelmente altos, tornando essa alternativa economicamente inviável. Portanto, a análise custo-benefício demonstra que, nas condições atuais, o uso de turbinas eólicas não é aconselhável.

Considerando que a área total dos painéis solares é de aproximadamente 621 m^2 , é viável a instalação do gerador fotovoltaico no telhado **P**, que possui uma área estimada em cerca de 966 m^2 . Tal implementação não apenas se revela tecnicamente exequível, como também maximiza a utilização do espaço disponível, garantindo uma eficiente integração do sistema no edifício.

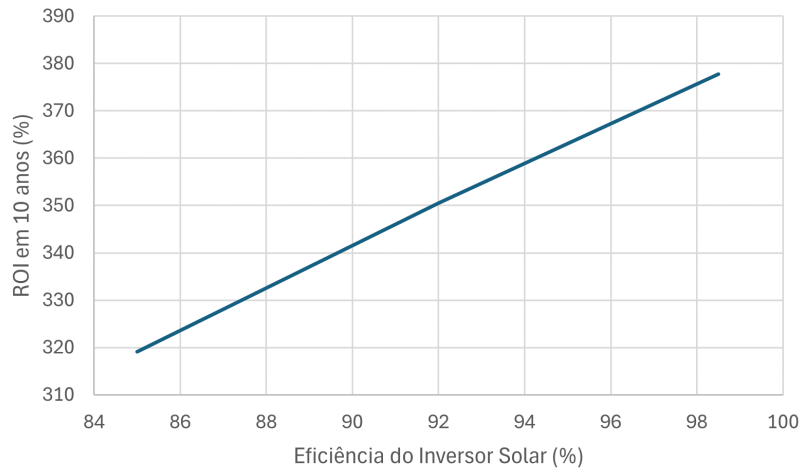
O sistema foi dimensionado com a máxima eficiência dos inversores (98,5% para o inversor solar [86] e 94% para o inversor eólico [80]). No entanto, estes não apresentam um desempenho consistente quando sujeitos a entradas de baixa tensão DC. Quando a tensão de entrada DC é baixa, os inversores podem não operar de forma uniforme, resultando em variações no rendimento e, possivelmente, em perdas de energia. Este comportamento pode ser atribuído a limitações técnicas na capacidade dos inversores em lidar com flutuações na entrada de tensão, afetando assim a consistência do sistema.

Para visualizar o impacto deste fenômeno no sistema, serão realizados testes com variações na eficiência dos inversores. Como a única fonte de energia renovável implementada neste sistema é a energia solar, apenas foram consideradas variações no inversor solar. Nas Figuras 5.14a e 5.14b é possível observar essas oscilações.



(a) Impacto no montante economizado anualmente.

Figura 5.14: Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema dimensionado na RCA.



(b) Impacto no ROI.

Figura 5.14: Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema dimensionado na RCA - continuação.

A influência do inversor tende a ser mínima, no entanto, não é insignificante. Essa conversão provoca uma ligeira, mas perceptível, redução no rendimento global do sistema, impactando marginalmente a eficiência. Embora subtil, essa perda deve ser considerada no dimensionamento do sistema para assegurar o máximo aproveitamento energético. Na Tabela 5.6 constam os máximos e mínimos dos fatores financeiros na RCA.

Tabela 5.6: Mínimos e máximos dos fatores financeiros consoante o rendimento do inversor solar na RCA.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Montante economizado anualmente (Milhares de €)	133,687	152,369
ROI (%)	319	378

5.4.1 Comparação do sistema dimensionado - Roménia

O sistema previamente dimensionado foi submetido ao Algoritmo 1 numa nova localização, na Roménia, com o objetivo de avaliar o desempenho e a eficiência do sistema em diferentes condições climáticas e geográficas. A escolha da Roménia está relacionada com o facto de ser um TO ativo e por permitir a análise do comportamento do gerador dimensionado num ambiente distinto daquele para o qual foi inicialmente projetado. Estes testes são fundamentais para verificar a adaptabilidade do sistema em climas mais frios, com baixa irradiação solar e mais ventosos, em contraste com o clima quente, de alta irradiação solar e vento pouco intenso na RCA.

Esta fase tem como finalidade assegurar que o sistema possa ser implementado com sucesso em diversas regiões, mantendo a sua eficácia e contribuindo para a expansão das ER. Para este teste, as únicas alterações foram a análise climatológica da localização e o preço do gasóleo por litro, sendo cerca de **1,5€** na Roménia. Nas Figuras 5.15 e 5.16, é possível observar a temperatura e a irradiação média diária na Roménia nos meses de dezembro e agosto, sendo que os dados dos restantes meses podem ser consultados no Anexo B.

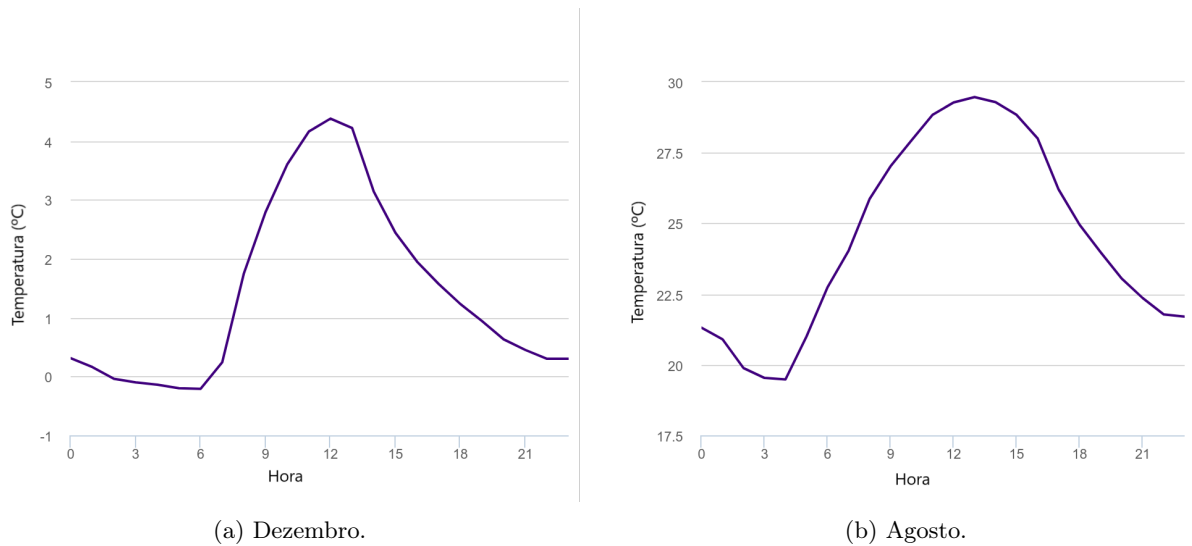


Figura 5.15: Temperatura média diária na Roménia.

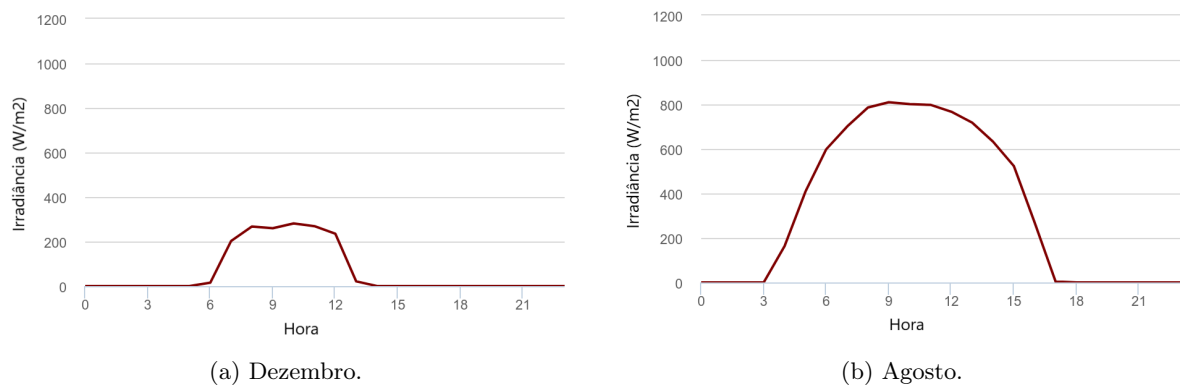


Figura 5.16: Irradiância média diária na Roménia.

Tal como na análise climatológica da RCA, os dados de humidade e velocidade do vento foram recolhidos para cada hora do ano, entre 2005 e 2020 [75]. Nas Figuras 5.17 e 5.18, é possível observar a humidade e a velocidade do vento ao longo dos meses de dezembro e agosto na Roménia. Os dados relativos aos restantes meses encontram-se disponíveis no Anexo B.

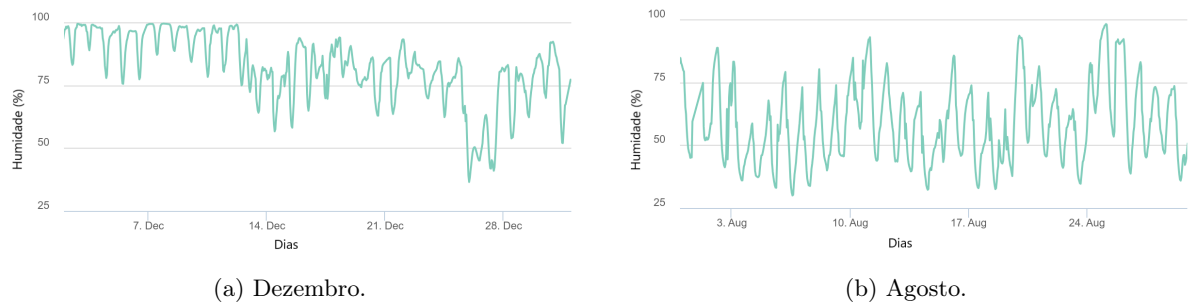


Figura 5.17: Humidade ao longo dos meses de dezembro e agosto na Roménia.

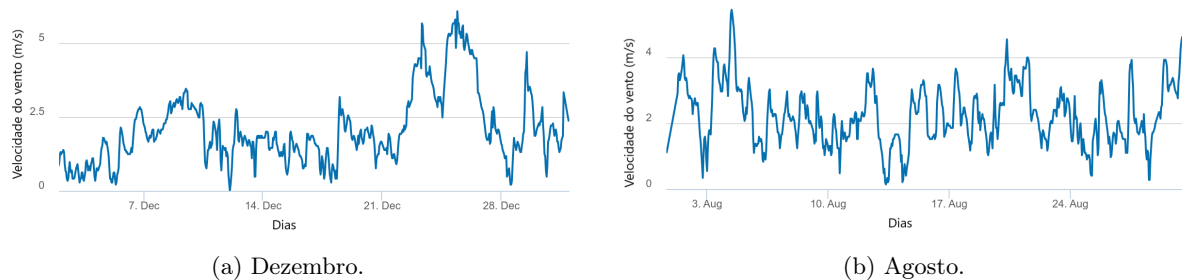


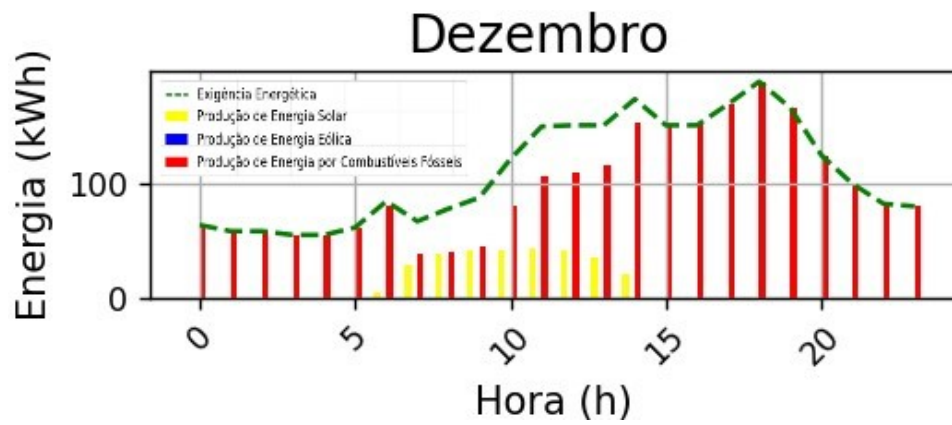
Figura 5.18: Velocidade do vento ao longo dos meses de dezembro e agosto na Roménia.

A Tabela 5.7 apresenta uma comparação entre o sistema dimensionado e o sistema otimizado para uma localização específica, a Roménia. Esta análise permite avaliar as diferenças de desempenho e eficiência entre o sistema inicial, projetado com base nas condições meteorológicas específicas da RCA, e o sistema ótimo, que é ajustado para condições locais específicas na Roménia. Através desta comparação, é possível identificar melhorias e ajustes necessários para potencializar a eficiência do sistema na Roménia.

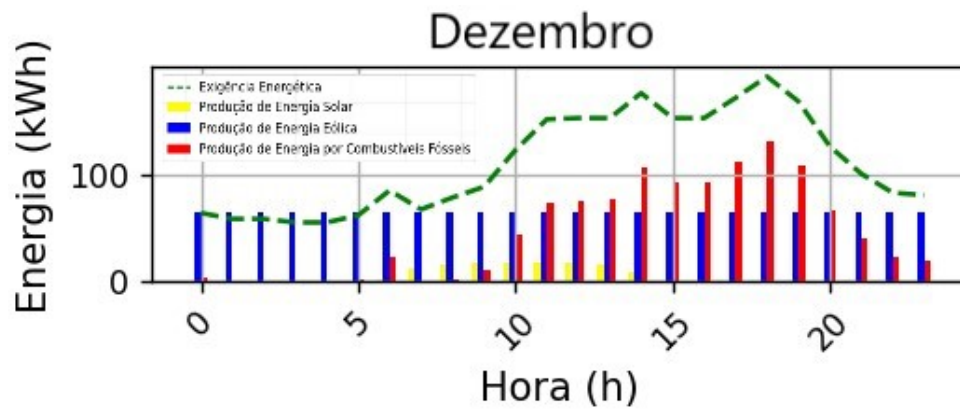
Tabela 5.7: Comparação do sistema dimensionado e o sistema ótimo na Roménia.

	Sistema dimensionado	Sistema otimizado
Energia solar (%)	100	44
Energia eólica (%)	0	56
Nº de painéis solares	1 100	484
Área total de painéis solares (m ²)	621	273
Nº de turbinas eólicas	0	26
I_0 (Milhares de €)	277,350	521,974
Redução do consumo de gásóleo anualmente (%)	26	62
Montante economizado anualmente (Milhares de €)	95,771	229,305
ROI máximo	200% em 10 anos	282% em 10 anos
PRI mínimo	3 anos	2 anos e 4 meses

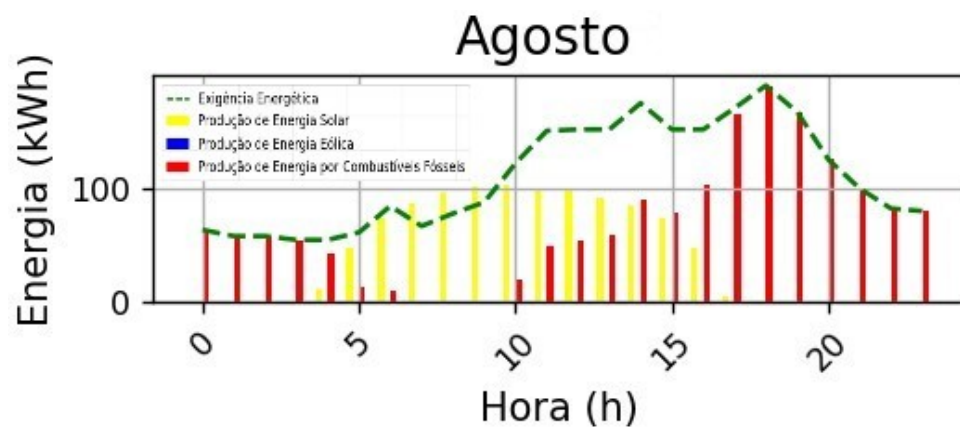
Nas Figuras 5.19a, 5.19b, 5.19c e 5.19d é possível observar as curvas de consumo-geração com o sistema dimensionado e o sistema otimizado implementado na Roménia para os meses de dezembro e agosto. As curvas de consumo-geração dos restantes meses constam no Anexo B.



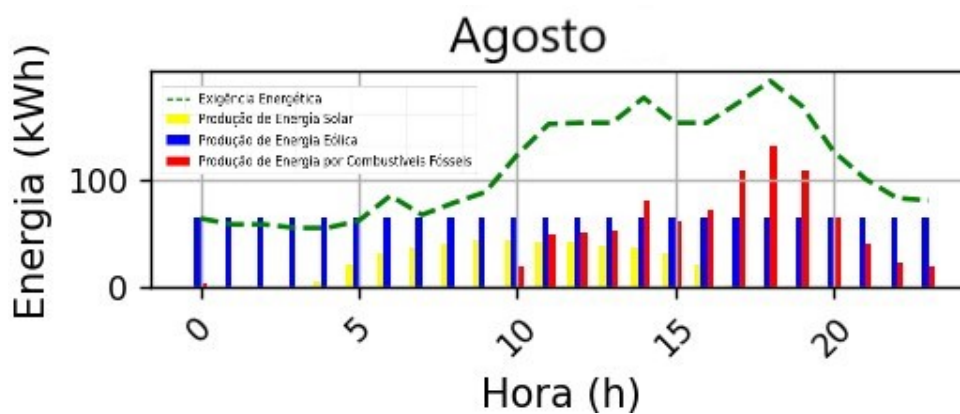
(a) Dezembro - sistema dimensionado



(b) Dezembro - sistema otimizado



(c) Agosto - sistema dimensionado

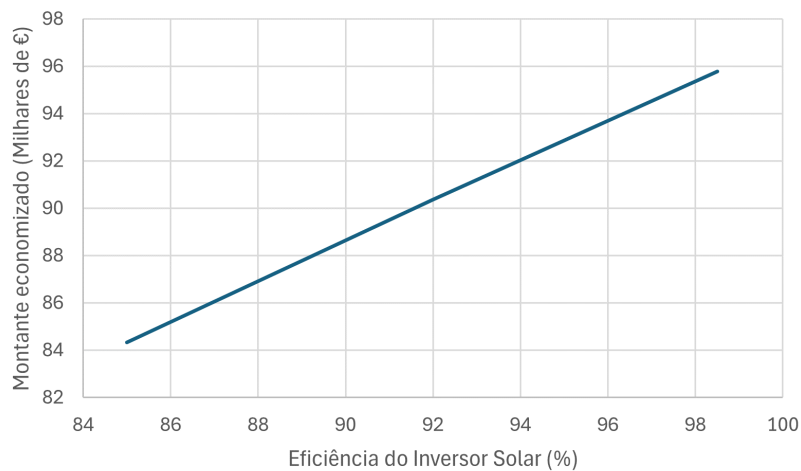


(d) Agosto - sistema otimizado

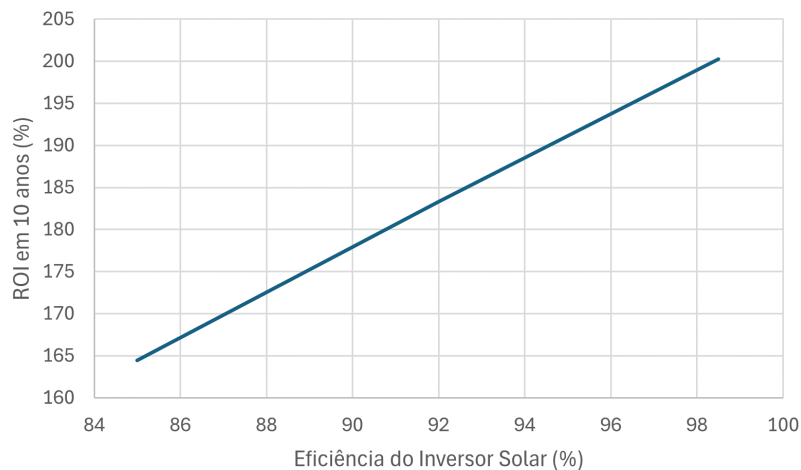
Figura 5.19: Curvas consumo-geração do sistema dimensionado e do sistema otimizado na Roménia.

O sistema dimensionado, embora não seja o ideal para a Roménia devido às suas condições climatológicas, tem a capacidade de reduzir cerca de 26% no consumo de gasóleo. Além disso, apresenta um PRI de três anos e um ROI de 200%, valores que se aproximam bastante aos valores alcançados pelo sistema otimizado.

Como mencionado no subcapítulo anterior, o sistema dimensionado para a RCA utilizou a eficiência máxima tanto do inversor solar quanto do inversor eólico. O mesmo princípio foi aplicado aos sistemas dimensionado e otimizado na Roménia. Para visualizar a influência das variações na eficiência dos inversores no rendimento do sistema, foram realizados testes específicos. Dado que a única fonte de energia renovável implementada neste sistema é a energia solar, apenas foram consideradas variações no inversor solar. Portanto, a única alteração realizada é na eficiência do inversor solar para o sistema dimensionado. Nas Figuras 5.20a e 5.20b constam essas alterações.



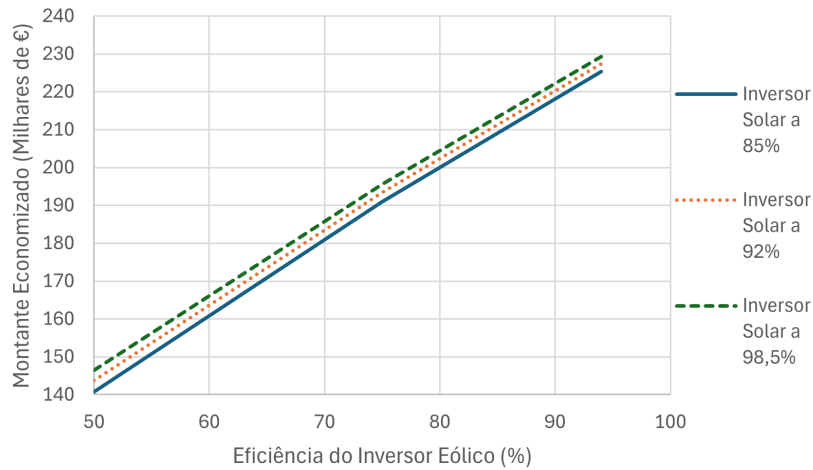
(a) Impacto no montante economizado anualmente.



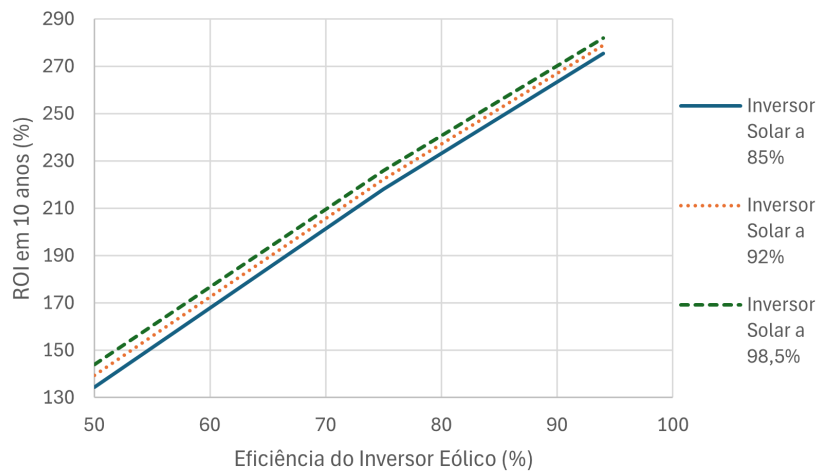
(b) Impacto no ROI.

Figura 5.20: Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema dimensionado na Roménia.

No sistema otimizado para a Roménia, que já integra energia eólica, as variações foram feitas simultaneamente nos dois inversores, como ilustrado nas Figuras 5.21a e 5.21b.



(a) Impacto no montante economizado anualmente.



(b) Impacto no ROI.

Figura 5.21: Influência do rendimento do inversor solar nos fatores financeiros do sistema otimizado na Roménia.

É evidente que, em ambos os casos, quanto maior for o rendimento, maior será a rentabilidade do sistema. Esse fenómeno pode ocorrer quando a produção de energia é reduzida, resultando numa menor tensão DC de entrada no inversor.

Quando a produção de energia por ER é baixa, como em dias nublados ou sem vento, a energia gerada é menor, causando uma diminuição na tensão de entrada no inversor. Apesar dessa queda, como a produção de energia nesses momentos já é limitada, o impacto no projeto é mínimo. Portanto, a eficiência do sistema permanece suficiente para garantir a viabilidade e a rentabilidade geral do projeto ao longo do tempo. Na Tabela 5.8 constam os máximos e mínimos dos fatores financeiros na Roménia, quer no sistema dimensionado quer no sistema otimizado.

Tabela 5.8: Mínimos e máximos dos fatores financeiros consoante o rendimento dos inversores na Roménia.

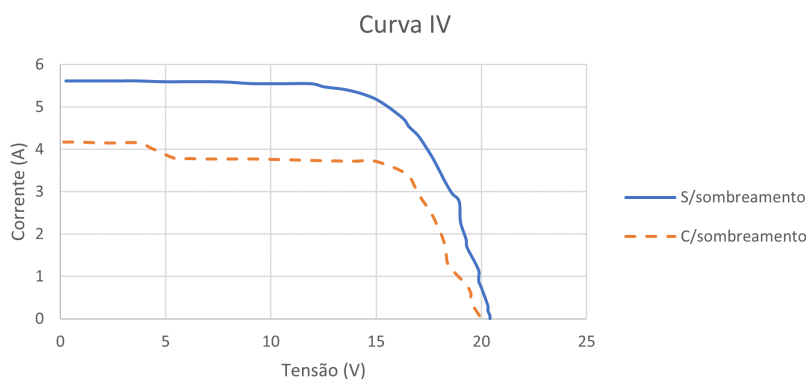
Parâmetro	Sistema dimensionado		Sistema otimizado	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Montante economizado anualmente (Milhares de €)	84,34	95,771	140,693	229,305
ROI (%)	164	200	134	282

5.5 Influência no Rendimento

Para garantir a viabilidade e a eficiência do projeto, é essencial considerar o rendimento do sistema como um fator determinante. A manutenção adequada dos painéis solares desempenha um papel crucial nesse contexto. Impurezas e detritos que se acumulam na superfície dos painéis podem comprometer significativamente o desempenho do sistema, uma vez que bloqueiam a radiação solar e reduzem a quantidade de luz que chega às células fotovoltaicas.

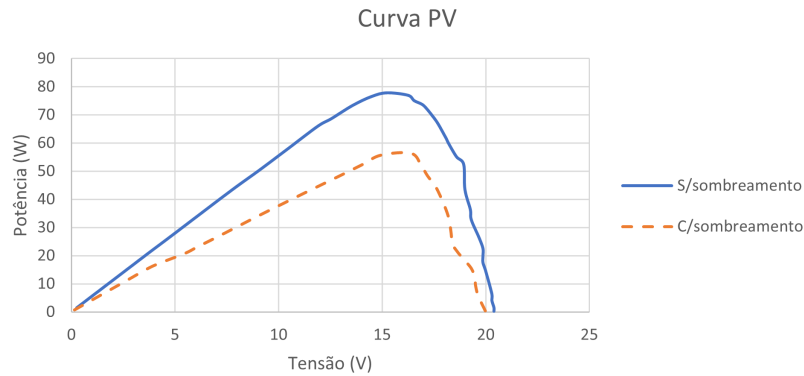
Além das questões de manutenção, fatores climáticos incontrolláveis, como a presença de nuvens, impactam o rendimento dos sistemas solares. As nuvens diminuem a irradiância solar ao bloquearem parte da radiação que chega à superfície terrestre. Este fenómeno reduz a eficiência dos painéis solares, uma vez que a quantidade de energia convertida em eletricidade é diretamente proporcional à intensidade da luz solar que incide sobre os mesmos.

Deste modo, a análise detalhada das condições ambientais e a implementação de um programa de manutenção regular são fundamentais para maximizar o rendimento dos sistemas solares. A manutenção preventiva e a limpeza dos painéis ajudam a minimizar perdas de eficiência, enquanto a consideração dos padrões climáticos locais permite uma melhor estimativa da produção energética e a otimização do desempenho do sistema ao longo do tempo. A gestão adequada destes aspetos contribui para a sustentabilidade e viabilidade económica do projeto energético. Nas Figuras 5.22a, 5.22b e 5.22c é possível observar a influência das impurezas, tal como o padrão testado, com $G=850 \text{ W/m}^2$ e $T=21^\circ\text{C}$.



(a) Curva I-V com e sem impurezas.

Figura 5.22: Curvas características I-V e P-V com e sem impurezas.



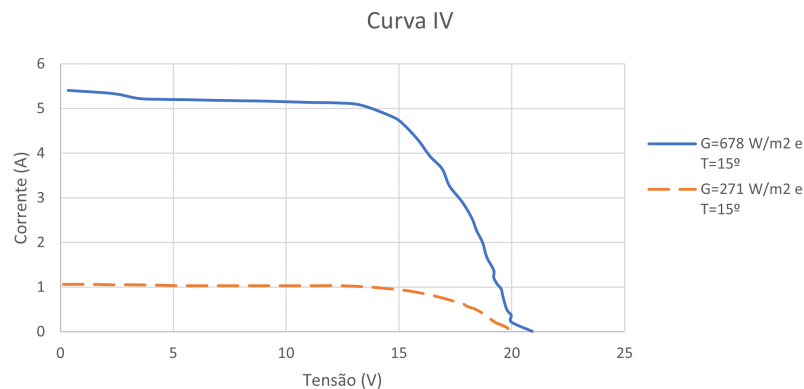
(b) Curva P-V com e sem impurezas.



(c) Padrão testado.

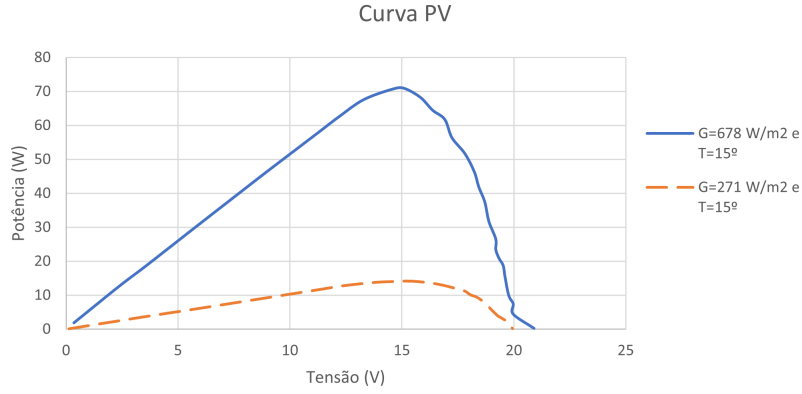
Figura 5.22: Curvas características I-V e P-V com e sem impurezas - continuação.

Neste exemplo, o fenômeno resulta numa redução aproximada de 43% no rendimento do painel solar. Esta diminuição na eficiência está diretamente relacionada com a quantidade e a extensão das células fotovoltaicas afetadas por obstruções na radiação solar. A magnitude da redução pode variar conforme o número de células que estão bloqueadas e a intensidade da obstrução. Nas Figuras 5.23a e 5.23b é possível observar a influência das nuvens, com $G=678 \text{ W/m}^2$ e $T=15^\circ\text{C}$ (céu limpo) e com $G=271 \text{ W/m}^2$ e $T=15^\circ\text{C}$ (céu nublado).



(a) Curva I-V com céu limpo e céu nublado.

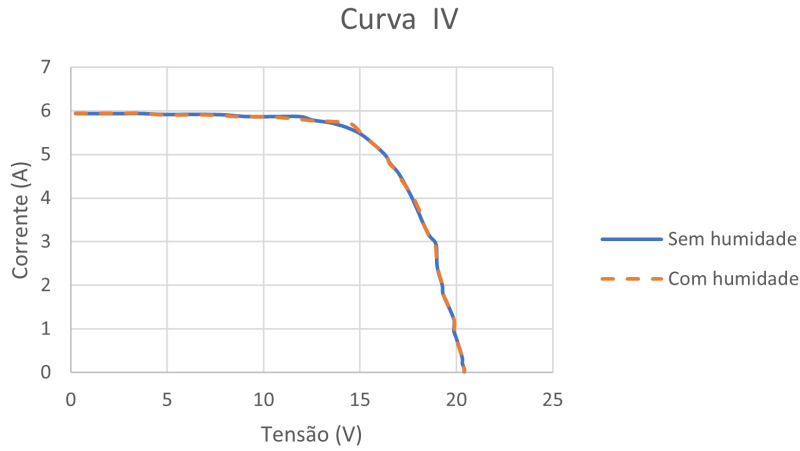
Figura 5.23: Curvas características I-V e P-V com céu limpo e céu nublado.



(b) Curva P-V com céu limpo e céu nublado.

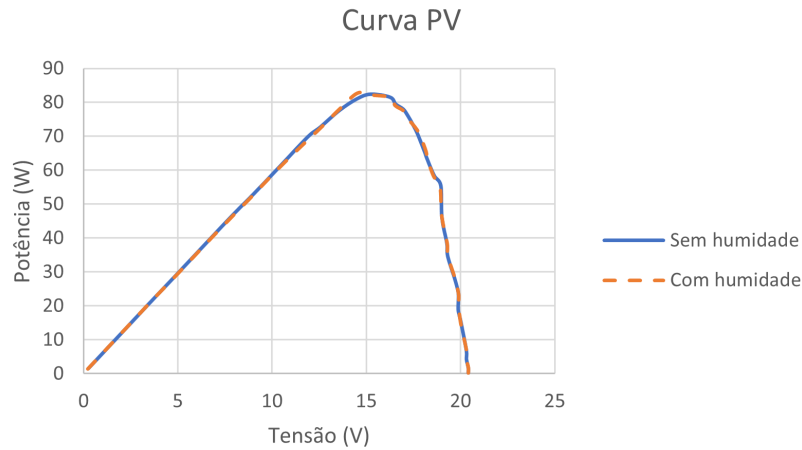
Figura 5.23: Curvas características I-V e P-V com céu limpo e céu nublado - continuação.

Foi realizado um teste para avaliar o impacto de um padrão de sombreamento aplicando água sobre a superfície dos painéis solares, de modo a simular condições de humidade. O objetivo foi determinar se esta variável afeta o rendimento dos painéis solares. Os resultados indicam que, sob as condições testadas, o padrão de sombreamento (humidade) simulado através da pulverização de água não exerceu qualquer influência significativa sobre a eficiência dos painéis. Nas Figuras 5.24a e 5.24b é possível observar a influência da humidade, com $G=900 \text{ W/m}^2$ e $T=24 \text{ }^\circ\text{C}$.



(a) Curva I-V com e sem humidade.

Figura 5.24: Curvas características I-V e P-V com e sem humidade.



(b) Curva P-V com e sem humidade.

Figura 5.24: Curvas características I-V e P-V com e sem humidade - continuação.

Apesar da humidade não afetar diretamente no rendimento dos painéis solares, esta variável pode impactar na eficiência dos mesmos a longo prazo. A humidade pode favorecer a acumulação de poeira e detritos na superfície dos painéis e também acelerar a degradação dos componentes elétricos e conexões dos painéis solares, turbinas eólicas, inversores e controladores, especialmente se não forem bem isolados.

No que diz respeito à energia eólica, é necessário a manutenção regular das turbinas para assegurar o máximo rendimento do sistema. A limpeza, tanto interior quanto exterior, deve ser realizada com frequência para evitar a acumulação de detritos e impurezas que possam comprometer o funcionamento das turbinas e levar à sua inoperacionalidade.

Para otimizar o desempenho das turbinas eólicas, é essencial abordar os *wake effects*, que ocorrem devido ao posicionamento das turbinas. Para minimizar essas perdas, é fundamental considerar cuidadosamente a localização e a orientação das turbinas. Um planeamento estratégico do *layout* das turbinas pode reduzir significativamente o impacto dos *wake effects*, melhorando assim a eficiência global do sistema, ao maximizar a produção de energia.

6 Discussão

Neste capítulo, será realizada a discussão dos resultados apresentados anteriormente, com foco em dois pontos essenciais: avaliação de cenários e fatores que poderão influenciar o rendimento do sistema.

6.1 Avaliação de Cenários

O local da instalação do gerador é um fator determinante para o desempenho dos sistemas híbridos. A temperatura, a irradiância, a humidade e a velocidade do vento são variáveis que impactam diretamente a produção de energia e, consequentemente, a viabilidade económica do sistema. Para a presente análise, foram escolhidos dois locais distintos: RCA e Roménia. Estas regiões, diferentes TO, apresentam variações relativamente às condições meteorológicas e geográficas. Esta diversidade permite avaliar a influência das variáveis na eficiência dos sistemas híbridos.

Ao analisar os dois cenários de implementação, é evidente que a adoção de um sistema híbrido na Roménia, seja no sistema dimensionado seja no sistema otimizado, resulta numa redução significativa no consumo de gasóleo.

No caso do sistema otimizado na Roménia, a redução no consumo de gasóleo é cerca de 62%. Este resultado é atribuído à integração eficiente das fontes de ER disponíveis, nomeadamente a energia solar e eólica. As turbinas eólicas continuam a produzir energia durante a noite, desde que haja vento, enquanto os painéis fotovoltaicos geram energia durante o dia, aproveitando a irradiância solar. A sinergia entre estas duas fontes de energia permite uma cobertura mais abrangente da exigência energética e uma redução substancial na dependência de geradores a gasóleo.

Em contraste, o sistema dimensionado na RCA, que apenas utiliza painéis fotovoltaicos devido à insuficiente velocidade média do vento (3 m/s), apresenta uma redução do consumo de gasóleo de apenas 26%. Neste cenário, a produção de energia é limitada ao período diurno, resultando na dependência contínua do gerador a gasóleo durante a noite. Apesar da menor redução no consumo de gasóleo, este sistema possui um investimento inicial mais baixo, que se traduz num ROI mais elevado e um PRI inferior.

O sistema otimizado na Roménia exige um investimento inicial mais elevado, mas a significativa redução no consumo de gasóleo proporciona um ROI estimado em cerca de 282% ao longo de 10 anos, com um PRI relativamente próximo ao do sistema dimensionado para a RCA. Assim, embora o investimento inicial seja mais alto, os benefícios financeiros a longo prazo, aliados à redução substancial no consumo de combustíveis fósseis, fazem do sistema otimizado na Roménia uma opção mais vantajosa em termos de sustentabilidade e rentabilidade a longo prazo.

Todo o cenário deve ser analisado sob diversas dimensões, incluindo os aspetos climatológicos e geográficos. No caso dos dois locais estudados, tanto no cenário dimensionado quanto no otimizado, observou-se que nenhuma das localizações selecionadas apresentava condições propícias para a exploração da energia hidráulica. Na análise realizada para as regiões em questão, não foi possível reunir dados referentes a esta fonte de energia devido à ausência de rios ou pequenos canais de água.

A energia hidráulica, quando disponível, pode atuar como um complemento valioso às fontes de ER, oferecendo uma capacidade adicional de geração durante períodos em que outras fontes, como a solar e a eólica, possam estar menos eficientes. A integração de energia hidráulica com energia solar e eólica poderia aumentar a estabilidade do sistema energético, especialmente em regiões com variabilidade climática e geográfica.

Assim, a ausência de viabilidade da energia hidráulica nos locais analisados limita a capacidade de maximizar a diversidade e a resiliência das soluções energéticas híbridas.

A avaliação das condições climáticas e geográficas é crucial para identificar todas as possibilidades de fontes de ER e otimizar a configuração do sistema para responder às necessidades energéticas. A análise

aprofundada destas variáveis poderia revelar oportunidades adicionais para a integração de diferentes tecnologias e maximizar a eficiência e a sustentabilidade de um sistema energético.

6.2 Análise Tático-Operacional

A integração da energia solar e eólica nas operações militares representa uma evolução significativa no modo como as Forças Armadas planeiam e executam as suas missões. Esta estratégia, que alia sustentabilidade e inovação tecnológica, traz benefícios táticos e logísticos capazes de transformar profundamente o cenário operacional. A seguir, serão detalhados os aspetos fundamentais que tornam esta integração uma escolha estratégica para o futuro das Forças Armadas em diversos contextos tático-operacionais.

Historicamente, um dos principais desafios logísticos enfrentados pelas operações militares é a garantia do fornecimento constante de combustíveis fósseis. Estes recursos, necessários para operar viaturas, geradores e outros equipamentos essenciais, muitas vezes dependem de comboios de transporte altamente vulneráveis a ataques do Inimigo ou possíveis acidentes. A adoção de sistemas de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas, permite que as seja gerada energia localmente, reduzindo drasticamente a necessidade de reabastecimentos frequentes.

A capacidade de utilizar sistemas de energia renovável de alta mobilidade oferece um grau inédito de flexibilidade para as operações militares. Apesar de não ter sido estudado nestes sistemas a flexibilidade dos sistema energético, painéis solares leves e dobráveis, aliados a turbinas eólicas compactas e fáceis de montar, permitem que se estabeleçam posições temporárias em locais de difícil acesso sem a necessidade de infraestruturas energéticas complexas. Por exemplo, em situações onde o transporte de combustíveis é logisticamente e financeiramente dispendioso, podem beneficiar de sistemas autossustentáveis. Estes dispositivos também podem ser usados em viaturas e drones, prolongando a duração das missões sem a necessidade de retorno ou espera para o reabastecimento.

A furtividade é uma prioridade em qualquer operação militar, especialmente em cenários onde a exposição pode comprometer a segurança das nossas forças. Geradores a combustível, frequentemente usados em campos militares, produzem ruídos e emissões térmicas que podem ser detetados por equipamentos inimigos. Em contraste, sistemas de energia renovável são silenciosos no entanto, ainda podem ser detetados através do brilho dos painéis solares ou altura de uma turbina eólica.

A resiliência é um elemento essencial em cenários quer de conflito quer de paz. Sistemas de energia renovável aumentam a capacidade de enfrentar interrupções no fornecimento energético causadas por sabotagem ou desastres naturais. A diversificação das fontes de energia reduz a dependência de uma única infraestrutura, garantindo operações contínuas mesmo em situações adversas. Este tipo de redundância é essencial em operações onde a falha no fornecimento energético pode comprometer o cumprimento da missão.

Apesar das inúmeras vantagens, a integração da energia solar e eólica em operações militares também apresenta desafios. A intermitência das fontes renováveis é uma preocupação, especialmente em situações onde condições climáticas desfavoráveis possam reduzir a eficiência dos sistemas. Para mitigar este problema, é necessário investir em soluções de armazenamento de energia, como baterias de alta capacidade, que permitam o uso da energia acumulada durante períodos de baixa geração. Além disso, é fundamental desenvolver tecnologias que combinem fontes renováveis com sistemas tradicionais de geração, criando soluções híbridas capazes de garantir o fornecimento ininterrupto de energia.

Por fim, a integração bem-sucedida de ER requer um esforço significativo de formação e adaptação cultural. Os militares devem ser instruídos sobre o uso e manutenção destes sistemas, bem como sobre a importância estratégica da transição para fontes de energia mais sustentáveis. Esta mudança cultural pode enfrentar resistência inicial, mas é crucial para assegurar o sucesso a longo prazo.

7 Conclusão

A integração de ER no contexto militar representa um avanço significativo tanto para a sustentabilidade quanto para a eficiência operacional das FNDs. Este estudo demonstrou que a utilização de fontes de energia solar e eólica não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, como também proporciona benefícios económicos e ambientais.

Os dimensionamentos realizados para os sistemas híbridos em diferentes localizações, como a RCA e a Roménia, evidenciam que a aplicação destas tecnologias é viável e vantajosa. A capacidade de gerar energia localmente para autoconsumo melhora a autonomia das operações militares, reduz os custos operacionais e minimiza a logística relacionada com o abastecimento de combustíveis fósseis.

Além disso, a adaptação de sistemas de contentores militares para abrigar sistemas de ER destaca a flexibilidade e a aplicabilidade dessas soluções em diversos cenários geográficos e operacionais. A análise do envolvimento de Portugal em regiões em todo o mundo reafirma a importância estratégica de adotar práticas sustentáveis em missões internacionais.

Os resultados deste estudo indicam que a incorporação de ER aumenta a resiliência energética das FNDs, contribuindo para a segurança energética e a sustentabilidade das operações. A adoção dessas tecnologias reflete uma resposta pró-ativa às exigências ambientais contemporâneas e às necessidades operacionais das Forças Armadas.

A aplicação de ER nas FNDs é uma estratégia eficaz e sustentável que deve ser considerada e implementada em larga escala. A transição para um modelo energético mais verde e eficiente não só responde às metas ambientais, como fortalece a capacidade operativa e a sustentabilidade das operações militares.

Embora este estudo tenha fornecido uma análise detalhada da integração de ER no contexto militar, existem várias áreas que podem ser exploradas em trabalhos futuros para aprofundar a compreensão e a aplicação destas tecnologias. Uma sugestão importante é investigar o potencial de tecnologias emergentes de ER, como a biomassa e energia geotérmica. Estudos futuros poderão avaliar a viabilidade e o impacto dessas tecnologias comparativamente com fontes de energia solar, eólica e hidráulica.

Uma outra área de pesquisa relevante é a análise do ciclo de vida e do impacto ambiental dos sistemas de ER. Realizar estudos detalhados sobre o ciclo de vida desses sistemas pode auxiliar na identificação e mitigação de possíveis impactos ambientais associados à sua produção, operação e descarte, otimizando assim a sustentabilidade e reduzindo a pegada ecológica.

A integração com tecnologias de armazenamento de energia é igualmente importante. Sistemas de armazenamento avançados, como baterias e tecnologias de armazenamento térmico, podem ser combinados com fontes de ER melhorando a segurança e eficiência dos sistemas em ambiente tático-operacional. A pesquisa pode ter um foco na gestão da carga de consumo e na otimização do desempenho sob condições operacionais variáveis.

Investigar o impacto económico e político da transição para ER nas Forças Armadas também é uma área importante. Esse estudo pode avaliar os custos de implementação, economias operacionais e possíveis implicações para a estratégia e a política de defesa, ajudando a formular recomendações para políticas e investimentos futuros.

Referências

- [1] J. Mohtasham, Review Article - Renewable Energies, *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 1289–1297, ago. de 2015, [Online]. Disponível em: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.
- [2] A. J. Moulé, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 14, pp. 123-130, 2010. [Online]. Acedido: 15 de novembro de 2023. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/486407417/Current-Opinion-in-Solid-State-and-Materials-Science-14-2010-123-130>.
- [3] *Energias Renováveis e Sustentabilidade*, <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/energia-solar/>, Acedido: 15 de novembro de 2023.
- [4] A. Rachid, A. Goren, V. Becerra, J. Radulovic e S. Khanna, *Solar Energy Engineering and Applications* (Power Systems). Springer, 2023, ISBN: 3031208293, 9783031208294. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=A07225F58038C937E72FBC141D8F0360>.
- [5] A. McEvoy, T. Markvart e L. Castaner, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 2^a ed., A. McEvoy, T. Markvart e L. Castaner, eds. Academic Press, jan. de 2011.
- [6] *Breve História da Energia Solar*, <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>, Acedido: 11 de abril de 2024.
- [7] J. Engana Carmo, J. P. Neto Torres, G. Cruz e R. A. Marques Lameirinhas, Effect of the Inclusion of Photovoltaic Solar Panels in the Autonomy of UAV Time of Flight, *Energies*, vol. 14, n.º 4, p. 876, fev. de 2021.
- [8] High efficiency plants and building integrated renewable energy systems, em *Handbook of Energy Efficiency in Buildings*, Elsevier, 2019, pp. 441–595.
- [9] L. El Chaar, L. A. Lamont e N. El Zein, Review of photovoltaic technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n.º 5, pp. 2165–2175, jun. de 2011.
- [10] S. R. Bull, Renewable Energy Today and Tomorrow, *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, n.º 8, pp. 1216–1226, 2001. DOI: 10.1109/5.940290.
- [11] C. D. G. e P. Livreri e G. Vitale, Solar Nanoantennas energy based characterization, *Renew. Energy Power Qual. J.*, pp. 862–867, mai. de 2016.
- [12] M. V. K. Sethi e Pandey e P. Shukla, Use of nanotechnology in solar PV cell, *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 2, n.º 2, pp. 77–80, 2011.
- [13] T. Soga, Fundamentals of solar cell, em *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion*, Elsevier, 2006, pp. 3–43.
- [14] A. Khaligh e O. C. Onar, Energy Sources, em *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2018, pp. 725–765.
- [15] J. M. T. Pereira, Fundamentos de eletrónica teoria cap.7 - dispositivos optoelectrónicos, 2010.
- [16] R. A. Marques Lameirinhas, J. P. N. Torres e J. P. de Melo Cunha, A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications, *Energies*, vol. 15, n.º 5, p. 1823, mar. de 2022.
- [17] A. Khatibi, F. R. Astaraei e M. H. Ahmadi, Generation and Combination of the Solar Cells: A Current Model Review, *Energy Sci. Eng.*, vol. 7, n.º 2, pp. 305–322, fev. de 2019.
- [18] E. A. A. Hussein e M. T. Iqbal, Design of renewable energy system for a remote mobile office in Newfoundland, em *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EPEC.2016.7771678.

- [19] Y. Zhu e W. Xiao, A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer, *Sol. Energy*, vol. 196, pp. 346–357, jan. de 2020.
- [20] T. Stoffel, Terms and Definitions, em *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, Elsevier, 2013, pp. 1–19.
- [21] A. Gutiérrez Galeano, M. Bressan, F. Jiménez Vargas e C. Alonso, Shading Ratio Impact on Photovoltaic Modules and Correlation with Shading Patterns, *Energies*, vol. 11, n.º 4, p. 852, abr. de 2018.
- [22] *Energia Fotovoltaica: Manual sobre Tecnologias*. D. A. E., IST e U. Europeia, 2004.
- [23] A. Luque e S. Hegedus, eds., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Nashville, TN: John Wiley & Sons, abr. de 2003.
- [24] *Best Research-Cell Efficiency Chart*, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, Acedido: 29 de julho de 2024.
- [25] V. Nelson, *Wind Energy* (Energy and the Environment). Boca Raton, FL: CRC Press, mar. de 2009.
- [26] M. EL-Shimy, M. A. L. Badr e O. M. Rassem, Impact of large scale wind power on power system stability, em *2008 12th International Middle-East Power System Conference*, Aswan, Egypt: IEEE, mar. de 2008.
- [27] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz et al., Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, n.º 4, pp. 1002–1016, jun. de 2006.
- [28] R. K. Thakur, Analysis and control of a variable speed wind turbine drive system dynamics, em *2009 International Conference on Power Systems*, 2009, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICPWS.2009.5458447.
- [29] M. Ahmad, A. Khan, M. A. Raza, M. A. Khan e M. A. Rehman, Study, Design and Analysis of an Optimized Off-grid Renewable AC/DC microgrid for a Rural School in Swabi, Pakistan, em *2019 22nd International Multitopic Conference (INMIC)*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/INMIC48123.2019.9022780.
- [30] G. Johnson, Wind Energy Systems, em out. de 2006, p. 136.
- [31] J. F. Manwell, J. G. McGowan e A. L. Rogers, *Wind energy explained*, 2ª ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, dez. de 2009.
- [32] M. R. Patel e O. Beik, *Wind and solar power systems*, 3ª ed. London, England: CRC Press, mar. de 2021.
- [33] A. Chermitti, M. Bencherif, Z. Nakoul, N. Bibitriki e B. Benyoucef, Assessment parameters and matching between the sites and wind turbines, *Phys. Procedia*, vol. 55, pp. 192–198, 2014.
- [34] S. Mathew, Introduction of Wind Energy, em Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 1–9.
- [35] Weibull Analysis, *StatPoint Technologies, Inc*, 2009.
- [36] *Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA)*, <http://www.eia.gov/>, Acedido: 16 de novembro de 2023.
- [37] *Barragem a Fio de Água*, <https://goldenergy.pt/glossario/barragem-fio-agua/>, Acedido: 16 de novembro de 2023.

- [38] J. Liu, J. Zuo, Z. Sun, G. Zillante e X. Chen, Sustainability in Hydropower Development—A Case Study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 230–237, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.036. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211200648X>.
- [39] *Turbina Hidrelétrica*, <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-hidraulica/turbina-hidreletrica>, Acedido: 16 de novembro de 2023.
- [40] N. Kishor, S. P. Singh, A. S. Raghuvanshi e P. R. Sharma, Comparative performance study of QN and LM algorithms in predictive control for NNARX-identified model of hydro-power plant, *Eng. Comput.*, vol. 23, n.º 2, pp. 71–78, jun. de 2007.
- [41] M. Casini e Department of Planning, Design, and Technology of Architecture (PDITA), Sapienza University of Rome, Via Flaminia 72, 00196 - Rome, Italy, Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale, *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, 2015.
- [42] M. M. Hasan e G. Wyseure, Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador, *Water Sci. Eng.*, vol. 11, n.º 2, pp. 157–166, abr. de 2018.
- [43] K. T. M. Nurmiati Pasra Heri Suyanto, Analysis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Performance in DC/AC Inverter of On-Grid Solar Power Plant, *Atlantis Press*, 2021.
- [44] H. Qais, D. A.-S. Hussain, F. Malik, I. Dahham e S. Hassan, Hybrid Wind Solar Controller System, *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, vol. 2, p. 58, jun. de 2014.
- [45] P. Reis, *Manual e Guia Técnico de Energia Solar Fotovoltaica*, <https://www.portal-energia.com/manual-e-guia-tecnico-de-energia-solar-fotovoltaica-tecnologias-projecto-e-instalacao/>, Acedido: 15 de julho de 2024, fev. de 2019.
- [46] R. Mallwitz e B. Engel, Solar power inverters, abr. de 2010, pp. 1–7.
- [47] L. Salgado, *Apoio Logístico às Forças Nacionais Destacadas*, 2001.
- [48] M. Zhong, Q. Li, R. Wang e J. Cao, Research on Life Cycle Cost of Military Connected-Container and Connector, em *2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, vol. Part 1, 2011, pp. 416–419. DOI: 10.1109/ICIEEM.2011.6035189.
- [49] *11.ª Força Nacional Destacada na República Centro-Africana Distinguida com a Medalha das Nações Unidas*, <https://www.exercito.pt/pt/informacao-publica/noticias/4626?fbclid=IwAR3HVZ-ZotRCmK1W8v5Qg82suFzQgWsMj9xfN0v5QvqRrfsPeo9xc6v0mRM>, Acedido: 19 de novembro de 2023.
- [50] U. Berardi, E. Tomassoni e K. Khaled, A Smart Hybrid Energy System grid for energy efficiency in remote areas for the army, *Energies*, vol. 13, n.º 9, p. 2279, mai. de 2020.
- [51] *Container Sales and Rentals*, <https://mccontainers.com/>, Acedido: 4 de dezembro de 2023.
- [52] *20ft DV Military Grade*, <https://mccontainers.com/product/20ft-dv-military-grade/>, Acedido: 4 de dezembro de 2023.
- [53] *Átomos metálicos empilhados: Estrutura Cristalina, Ligações metálicas não direccional, Electrões de valência*, *Electrões Livres, Grande Mobilidade*, <https://paginas.fe.up.pt/~mcnunes/QMAR0708/materiaiscondutoresQMAR.pdf>, Acedido: 20 de dezembro de 2023.
- [54] *Metals, metallic elements and alloys - thermal conductivities*, https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html, Acedido: 20 de dezembro de 2023.
- [55] D. U. Shah, M. C. D. Bock, H. Mulligan e M. H. Ramage, Thermal conductivity of engineered bamboo composites, *J. Mater. Sci.*, vol. 51, n.º 6, pp. 2991–3002, mar. de 2016.

- [56] *Plywood (5 ply, beech), parallel to face layer*, <https://simulatentoast.files.wordpress.com/2013/03/plywood.pdf>, Acedido: 20 de dezembro de 2023.
- [57] PÚBLICO, *Militares Portugueses Deixam Afeganistão a Partir de 1 de Maio*, <https://www.publico.pt/2021/04/15/politica/noticia/militares-portugueses-deixam-afeganistao-partir-1-maio-1958643>, Acedido: 18 de dezembro de 2023, abr. de 2021.
- [58] M. Machado, *Na Bósnia e Herzegovina 22 Anos Depois*, <https://www.operacional.pt/na-bosnia-e-herzegovina-22-anos-depois/>, Acedido: 18 de dezembro de 2023, jun. de 2018.
- [59] *Exército prepara pelotão de carros de combate para missão NATO na Eslováquia*, pt, <https://www.dn.pt/3048748632/exercito-prepara-pelotao-de-carros-de-combate-para-missao-nato-na-eslovaquia/>, Accessed: 2024-10-15.
- [60] Lusa, *Militares portugueses regressaram do Iraque e vão cumprir quarentena*, <https://sicnoticias.pt/especiais/coronavirus/2020-03-30-Militares-portugueses-regressaram-do-Iraque-e-vaio-cumprir-quarentena>, Accessed: 2024-10-15, mar. de 2020.
- [61] Lusa, *Portugal Termina Missão Militar no Kosovo ao Fim de 18 Anos*, <https://www.dn.pt/portugal/portugal-termina-missao-militar-no-kuosovo-ao-fim-de-18-anos-5431437.html>, Acedido: 18 de dezembro de 2023, Out de 2016.
- [62] M. Machado, *Missão na RCA - República Centro Africana*, <https://www.operacional.pt/missao-na-rca-republica-centro-africana/>, Acedido: 18 de dezembro de 2023, jul. de 2016.
- [63] *Exército inicia missão da NATO na Romênia*, <https://www.defesa.gov.pt/pt/comunicacao/noticias/Paginas/Exercito-inicia-missao-NATO-na-Romenia.aspx>, Acedido: 18 de dezembro de 2023.
- [64] *Testemunhos de quatro anos de presença das Forças Nacionais destacadas lusas em terras do sol nascente (2000-2004)*. Lisboa: Autoridade Nacional, 2021.
- [65] A. Lusa, *Cronologia da presença da GNR em Timor-Leste*, <https://www.dn.pt/portugal/cronologia-da-presenca-da-gnr-em-timor-leste-2893861.html>, Acedido: 18 de dezembro de 2023, nov. de 2012.
- [66] J. L. Palmer, Addressing Energy as a Military Cost, *Australian Defence Force Journal*, vol. 178, n.d.
- [67] *SunPower X-Series Residential SPR-X21-345*, <https://www.energysage.com/solar-panels/sunpower/783/spr-x21-345/>, Acedido: 12 de dezembro de 2023.
- [68] S. Peter, M. Schirmer, P. Lathan, G. Stimpfl e B. Ibrahim, Performance Analysis of a Solar-Powered Multi-Purpose Supply Container, *Sustainability*, vol. 14, n.º 9, 2022, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su14095525. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5525>.
- [69] C. Ulloa, M. E. Arce, G. Rey, J. L. Míguez e J. Hernández, Recycling COR-TEN® Sea Containers into Service Modules for Military Applications: Thermal Analysis, *Energies*, vol. 10, n.º 6, 2017, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10060820. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/6/820>.
- [70] *Data Sheet (PDF) of Aleo Solar P23 Module*, <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/ht22adhh0w84/P23-320-330W-EN-web.pdf>, Acedido: 10 de dezembro de 2023.
- [71] W. Kellogg, M. Nehrir, G. Venkataramanan e V. Gerez, Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, n.º 1, pp. 70–75, 1998. DOI: 10.1109/60.658206.
- [72] R. Hunter e G. Elliot, *Wind-Diesel Systems*. 1994.
- [73] J. Schaeffer, *Solar Living Source Book*. 1994.

- [74] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe e E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2^a ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, mai. de 2011.
- [75] *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html, jan. de 2016.
- [76] *HOMER pro - microgrid software for designing optimized hybrid microgrids*, <https://homerenergy.com/products/pro/index.html>.
- [77] P. Andru e A. Botchkarev, The Use of Return on Investment (ROI) in the Performance Measurement and Evaluation of Information Systems, jan. de 2011.
- [78] *Discounted Payback for Measuring Simple*, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUb-C13-b8d7384734abd5754ef331828ed3974b/pdf/GOVPUb-C13-b8d7384734abd5754ef331828ed3974b.pdf>, Acedido: 26 de junho de 2024.
- [79] *Datasheet of SZ-100-33MF*, <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/4113tku587i0o/bea9d45b752ef1fe14ad60b9a5d6f01f2.pdf>, Acedido: 22 de março de 2024.
- [80] *Datasheet of Aeolos-V 10kW*, <https://abei.ch/wp-content/uploads/2023/02/Aeolos-V-10kW-Brochure-1.pdf>, Acedido: 22 de julho de 2024.
- [81] *Report on the techno-economic study*, <https://www.km3net.org/wp-content/uploads/2021/07/D10.3-KM3NeT-techno-economic-study.pdf>, Acedido: 13 de junho de 2024.
- [82] *Google Earth*, <https://earth.google.com/>, Acedido: 24 de junho de 2024.
- [83] M. Edésio, E. Elias Lopes, D. Ruth e R. Nogueira, Proposta Metodológica para Validação de Imagens de Alta Resolução do Google Earth para a Produção de Mapas, jan. de 2011.
- [84] M. Engels, P. Boyd, T. Koehler et al., “Smart and Green Energy (SAGE) for Base Camps Final Report,” rel. téc., fev. de 2014.
- [85] *SIDC ruoqiang 100MW tower + 900MW PV CSP Project*, <https://solarpaces.nrel.gov/project/sidc-ruoqiang-100mw-tower-900mw-pv>, Acedido: 29 de julho de 2024.
- [86] *HT Series Inverter*, <https://en.goodwe.com/ht-series-three-phase-utility-scale-solar-inverter>, Acedido: 1 de agosto de 2024.

A Anexos - Algoritmo de Otimização

Neste anexo consta o algoritmo utilizada para o dimensionamento do gerador híbrido.

Algoritmo 1: Algoritmo de Otimização.

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib
4 matplotlib.use('TkAgg')
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import os
7 import math
8
9 # Definicao dos ficheiros para cada mes
10 #meses = ['janeiro', 'fevereiro', 'marco', 'abril', 'maio', 'junho', 'julho',
11          'agosto', 'setembro', 'outubro', 'novembro', 'dezembro'] #RCA
12 meses = ['janeiro1', 'fevereiro1', 'marco1', 'abril1', 'maio1', 'junho1', 'julho1', 'agosto1', 'setembro1', 'outubro1', 'novembro1', 'dezembro1'] #
13          Romania
14 file_paths = {mes: os.path.join(os.path.dirname(os.path.abspath(__file__)), f
15                                '{mes}_hres.csv') for mes in meses}
16
17
18 def solicitar_numero():
19     while True:
20         try:
21             demand_energy = float(input("Qual o gasto energetico medio por
22                                         hora em KWh? "))
23             return demand_energy
24         except ValueError:
25             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
26
27 def solicitar_solar():
28     while True:
29         try:
30             solar_per = float(input("Quanto % quer de energia solar ? (0 a 1)
31                                    "))
32             return solar_per
33         except ValueError:
34             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
35
36 def solicitar_area():
37     while True:
38         try:
39             solar_area = float(input("Qual a area de cada painel solar em m2?
40                                     "))
41             return solar_area
42         except ValueError:
```

```

40         print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
41
42 def solicitar_potmax():
43     while True:
44         try:
45             solar_potm = float(input("Qual o Pmax de cada painel solar em KW?
46                                     "))
47             return solar_potm
48         except ValueError:
49             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
50
51 def solicitar_solar_eff():
52     while True:
53         try:
54             solar_eff = float(input("Qual a eficiencia de cada painel solar?
55                                     (0 a 1) "))
56             return solar_eff
57         except ValueError:
58             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
59
60 def solicitar_preco():
61     while True:
62         try:
63             solar_preco = float(input("Qual o preco de cada painel solar? "))
64             return solar_preco
65         except ValueError:
66             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
67
68 def solicitar_windpmax():
69     while True:
70         try:
71             wind_pmax = float(input("Qual a potencia de cada turbina eolica
72                                     em KW? "))
73             return wind_pmax
74         except ValueError:
75             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
76
77 def solicitar_areavarrida():
78     while True:
79         try:
80             av = float(input("Qual a area varrida da turbina eolica em m2?"))
81             return av
82         except ValueError:
83             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
84
85 def solicitar_wind_eff():
86     while True:
87         try:
88             wind_eff = float(input("Qual a eficiencia de cada turbina eolica?
89                                     (0 a 1) "))
90             return wind_eff

```

```

87         except ValueError:
88             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
89
90 def solicitar_coefpot():
91     while True:
92         try:
93             wind_cp = float(input("Qual o coeficiente de potencia de cada
94                                 turbina eolica? (0 a 1) "))
95             return wind_cp
96         except ValueError:
97             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
98
99 def solicitar_windpreco():
100     while True:
101         try:
102             wind_preco = float(input("Qual o preco de cada turbina eolica? ")
103                                     )
104             return wind_preco
105         except ValueError:
106             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
107
108 def solicitar_inversorsolar():
109     while True:
110         try:
111             inv = float(input("Qual o preco do inversor solar?"))
112             return inv
113         except ValueError:
114             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
115
116 def solicitar_effinvsolar():
117     while True:
118         try:
119             eff_inv = float(input("Qual a eficiencia do inversor solar? (0 a
120                                 1)"))
121             return eff_inv
122         except ValueError:
123             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
124
125 def solicitar_inversoreolico():
126     while True:
127         try:
128             inv = float(input("Qual o preco do inversor eolico?"))
129             return inv
130         except ValueError:
131             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
132
133 def solicitar_effinveolico():
134     while True:
135         try:
136             eff_inv = float(input("Qual a eficiencia do inversor eolico? (0 a
137                                 1)"))

```

```

134         return eff_inv
135     except ValueError:
136         print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
137
138 def solicitar_controlador():
139     while True:
140         try:
141             inv = float(input("Qual o preco dos controladores hibridos?"))
142             return inv
143         except ValueError:
144             print("Entrada invalida. Por favor, digite um numero valido.")
145
146
147 gasto = solicitar_numero()
148 gasto_array = [gasto] * 24
149 aumento_refeicoes = [0.58, 0.53, 0.53, 0.50, 0.50, 0.56, 0.77, 0.61, 0.71 ,0.
150                       80, 1.11, 1.37, 1.38, 1.38, 1.59, 1.38, 1.38, 1.55, 1.73, 1.52, 1.14, 0.9
151                       1, 0.75, 0.73]
152 gasto_array_np = np.array(gasto_array)
153 aumento_refeicoes_np = np.array(aumento_refeicoes)
154 gasto_24 = gasto_array_np * aumento_refeicoes_np
155 percentagem_solar = solicitar_solar()
156 percentagem_eolica = 1 - percentagem_solar
157 area_painel = solicitar_area()
158 pmax = solicitar_potmax()
159 solar_eficiencia = solicitar_solar_eff()
160 panel_price = solicitar_preco()
161 windTmax = solicitar_windpmax()
162 area_varrida = solicitar_areavarrida()
163 wind_eficiencia = solicitar_wind_eff()
164 wind_cp = solicitar_coefpot()
165 windturbine_price = solicitar_windpreco()
166 custo_inversorsolar = solicitar_inversorsolar()
167 eff_inv = solicitar_effinvsolar()
168 custo_inversoreolico = solicitar_inversoreolico()
169 eff_inveolico = solicitar_effinveolico()
170 controlador_preco = solicitar_controlador ()
171
172 #Funcao que calcula a producao de energia solar
173 def solar_production(irradiance, number_panels, area_painel, solar_eficiencia
174 ):
175     return number_panels * irradiance * area_painel * solar_eficiencia
176
177 #Funcao que calcula a producao de energia eolica
178 def wind_production(wind_speed, area_varrida, wind_cp, wind_eficiencia):
179     potencia_por_hora = 0.5 * 1.225 * area_varrida * (wind_speed**3) *
180         wind_cp * wind_eficiencia
181     return potencia_por_hora / 1000
182
183 #Funcao que calcula os custos e faz plot dos resultados
184 def calcular_custos_e_plotar(file_paths, dias_mes, gasto_24, gasto,
185     percentagem_solar, percentagem_eolica, area_painel, pmax,
186     solar_eficiencia, panel_price, windTmax, area_varrida, wind_eficiencia,

```

```

wind_cp, windturbine_price, custo_inversorsolar, eff_inv,
custo_inversoreolico, eff_inveolico, controlador_preco):
179 fig, axs = plt.subplots(4, 3, figsize=(20, 20))
180 axs = axs.flatten()
181 custo_diesel_mes = [0] * 12
182 custo_diesel_mes_ER = [0] * 12
183 dias_mes = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31]
184 diferenca_diesel_mes = [0] * 12
185 for i, mes in enumerate(file_paths):
186     file_path = file_paths[mes]
187     weather_data = pd.read_csv(file_path)
188     SOLAR_CAPACITY = gasto * percentagem_solar #Calculo da capacidade da
189         energia solar consoante a percentagem e o gasto medio
189     WIND_CAPACITY = gasto * percentagem_eolica #Calculo da capacidade da
190         energia eolica consoante a percentagem e o gasto medio
190     number_panels = math.ceil(SOLAR_CAPACITY / pmax)
191     panel_area = number_panels * area_painel #Calculo da area total dos
192         paineis solares
192     optimized_solar_energy = eff_inv * solar_production(weather_data['
193         solar_irradiance'], number_panels, area_painel, solar_eficiencia)
193     optimized_wind_energy = wind_production(weather_data['wind_speed'],
194         area_varrida, wind_cp, wind_eficiencia)
194     number_windT = WIND_CAPACITY / optimized_wind_energy
195     number_windT_c = [math.ceil(numero) for numero in number_windT]
196     wind_prod = optimized_wind_energy * number_windT * eff_inveolico #
197         Calculo da energia eolica
197     total_greenenergy = optimized_solar_energy + wind_prod #Calculo de
198         toda a energia renovavel produzida
198     combustiveis_1 = np.maximum(gasto_24 - total_greenenergy, 0) #Calcula
199         o quanto tem o gerador de produzir para compensar a falta de
200         energia produzida pelas ER
199     combustiveis = np.round (combustiveis_1, 1)
200     custo_solar = number_panels * panel_price #Custo total da energia
201         solar
201     custo_eolica = windturbine_price * number_windT_c[0] #Custo total da
202         energia eolica
202     custo_inicial_total = custo_solar + custo_eolica +
203         custo_inversorsolar + custo_inversoreolico + controlador_preco #
204         Calculo do custo inicial total
203     custo_manutencao_anual = 0.015 * custo_inicial_total #Assumir que o
204         custo de manutencao anual de 5% do custo inicial
204     preco_diesel = 1.50 #Definicao do preco do diesel, RCA - 2.00euros/L
205         Romenia 1.50euros/L
205     consumo_diesel_1 = (gasto_24 * 37.2) / 146 #Calculo do consumo de
206         diesel por hora do gerador
206     consumo_diesel = np.round (consumo_diesel_1, 1)
207     consumo_diesel_sum = np.sum(consumo_diesel)
208     custo_diesel_dia_1 = preco_diesel * consumo_diesel_sum #Calculo do
209         consumo de diesel por dia do gerador
209     custo_diesel_dia = np.round (custo_diesel_dia_1, 0)
210     custo_diesel_mes[i] = custo_diesel_dia * dias_mes[i]

```

```

211     consumo_diesel_ER_1 = ((np.sum(combustiveis)) * 37.2) / 146 #Calculo
        do consumo de diesel por hora do gerador com a integracao das ER
212     consumo_diesel_ER = np.round (consumo_diesel_ER_1, 1)
213     custo_diesel_dia_ER_1 = preco_diesel * consumo_diesel_ER #Calculo do
        consumo de diesel por dia do gerador com a integracao das ER
214     custo_diesel_dia_ER = np.round (custo_diesel_dia_ER_1, 0)
215     custo_diesel_mes_ER[i] = custo_diesel_dia_ER * dias_mes[i]
216     diferenca_diesel_mes[i] = custo_diesel_mes[i] - custo_diesel_mes_ER[i]
        ] #Calculo do dinheiro poupado com a integracao das ER
217     print(f"0 custo total de diesel por dia sem energias renovaveis no
        mes de {mes} e ", custo_diesel_dia, "euros")
218     print(f"0 custo total de diesel por dia com energias renovaveis no
        mes de {mes} e ", custo_diesel_dia_ER, "euros")
219     print(f"0 dinheiro poupado em diesel no mes de {mes} e ",
        diferenca_diesel_mes[i], "euros")
220     print('\n')
221     width = 0.2
222     x = np.arange(len(categorias))
223     ax = axs[i]
224     ax.bar(x - 1.5 * width, optimized_solar_energy, width, label='
        Producao de Energia Solar', color='yellow')
225     ax.bar(x - 0.5 * width, wind_prod, width, label='Producao de Energia
        Eolica', color='blue')
226     ax.bar(x + 0.5 * width, combustiveis, width, label='Producao de
        Energia por Combustiveis Fosseis', color='red')
227     ax.plot(x, gasto_24, 'g--', label='Exigencia Energetica')
228
229     ax.set_title(mes.capitalize(), fontsize=16)
230     ax.set_xlabel('Hora (h)', fontsize=12)
231     ax.set_ylabel('Energia (kWh)', fontsize=12)
232     ax.tick_params(axis='x', rotation=45, labels=10)
233     ax.grid(True)
234     if i == 0:
235         ax.legend(fontsize=10)
236     plt.show()
237
238     return custo_diesel_mes, custo_diesel_mes_ER, diferenca_diesel_mes,
        custo_inicial_total, custo_manutencao_anual, number_panels,
        number_windT_c[0], panel_area
239 def calcular_custos_e_plotar_otimize(file_paths, dias_mes, gasto_24, gasto,
        percentagem_solar, percentagem_eolica, area_painel, pmax,
        solar_eficiencia, panel_price,
240                                     windTmax, area_varrida, wind_eficiencia,
        wind_cp, windturbine_price,
        custo_inversorsolar, eff_inv,
        custo_inversoreolico, eff_inveolico,
        controlador_preco):
241
242     custo_diesel_mes = [0] * 12
243     custo_diesel_mes_ER = [0] * 12
244     dias_mes = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31]

```

```

245 diferenca_diesel_mes = [0] * 12
246 for i, mes in enumerate(file_paths):
247     file_path = file_paths[mes]
248     weather_data = pd.read_csv(file_path)
249     SOLAR_CAPACITY = gasto * percentagem_solar #Calculo da capacidade da
        energia solar consoante a percentagem e o gasto medio
250     WIND_CAPACITY = gasto * percentagem_eolica #Calculo da capacidade da
        energia eolica consoante a percentagem e o gasto medio
251     number_panels = math.ceil(SOLAR_CAPACITY / pmax)
252     panel_area = number_panels * area_painel #Calculo da area total dos
        paineis solares
253     optimized_solar_energy = eff_inv * solar_production(weather_data['
        solar_irradiance'], number_panels, area_painel, solar_eficiencia)
254     optimized_wind_energy = wind_production(weather_data['wind_speed'],
        area_varrida, wind_cp, wind_eficiencia)
255     number_windT = WIND_CAPACITY / optimized_wind_energy
256     number_windT_c = [math.ceil(numero) for numero in number_windT]
257     wind_prod = optimized_wind_energy * number_windT * eff_inveolico #
        Calculo da energia eolica
258     total_greenenergy = optimized_solar_energy + wind_prod #Calculo de
        toda a energia renovavel produzida
259     combustiveis_1 = np.maximum(gasto_24 - total_greenenergy, 0) #Calcula
        o quanto tem o gerador de produzir para compensar a falta de
        energia produzida pelas ER
260     combustiveis = np.round(combustiveis_1, 1)
261     custo_solar = number_panels * panel_price #Custo total da energia
        solar
262     custo_eolica = windturbine_price * number_windT_c[0] #Custo total da
        energia eolica
263     custo_inicial_total = custo_solar + custo_eolica +
        custo_inversorsolar + custo_inversoreolico + controlador_preco #
        Calculo do custo inicial total
264     custo_manutencao_anual = 0.015 * custo_inicial_total #Assumir que o
        custo de manutencao anual e 5% do custo inicial
265     preco_diesel = 1.50 #Definicao do preco do diesel, RCA - 2.00euros/L
        Romenia 1.50euros/L
266     consumo_diesel_1 = (gasto_24 * 37.2) / 146 #Calculo do consumo de
        diesel por hora do gerador
267     consumo_diesel = np.round(consumo_diesel_1, 1)
268     consumo_diesel_sum = np.sum(consumo_diesel)
269     custo_diesel_dia_1 = preco_diesel * consumo_diesel_sum #Calculo do
        consumo de diesel por dia do gerador
270     custo_diesel_dia = np.round(custo_diesel_dia_1, 0)
271     custo_diesel_mes[i] = custo_diesel_dia * dias_mes[i]
272     consumo_diesel_ER_1 = ((np.sum(combustiveis)) * 37.2) / 146 #Calculo
        do consumo de diesel por hora do gerador com a integracao das ER
273     consumo_diesel_ER = np.round(consumo_diesel_ER_1, 1)
274     custo_diesel_dia_ER_1 = preco_diesel * consumo_diesel_ER #Calculo do
        consumo de diesel por dia do gerador com a integracao das ER
275     custo_diesel_dia_ER = np.round(custo_diesel_dia_ER_1, 0)
276     custo_diesel_mes_ER[i] = custo_diesel_dia_ER * dias_mes[i]

```

```

277     diferenca_diesel_mes[i] = custo_diesel_mes[i] - custo_diesel_mes_ER[i
        ] #Calculo do dinheiro poupado com a integracao das ER
278
279     return custo_diesel_mes, custo_diesel_mes_ER, diferenca_diesel_mes,
        custo_inicial_total, custo_manutencao_anual, number_panels,
        number_windT_c[0], panel_area, optimized_solar_energy, wind_prod,
        combustiveis
280
281 #Calcular o Retorno do Investimento
282 def calcular_ROI(diferenca_diesel, custo_inicial_total,
        custo_manutencao_anual, lifetime_project):
283     ROI = (((diferenca_diesel * lifetime_project) - ((custo_manutencao_anual
        * lifetime_project) + custo_inicial_total)) / ((
        custo_manutencao_anual * lifetime_project) + custo_inicial_total)) *
        100
284     return ROI
285
286 def converter_idade_para_anos_meses_dias(tempo):
287     anos = int(tempo)
288     meses_decimal = (tempo - anos) * 12
289     meses = int(meses_decimal)
290     dias_decimal = (meses_decimal - meses) * 30
291     dias = round(dias_decimal)
292
293     return anos, meses, dias
294 #Calcular o Prazo de Retorno do Investimento
295 def calcular_tempo_recuperacao(custo_inicial_total, diferenca_diesel):
296     Simple_Payback = custo_inicial_total / (diferenca_diesel -
        custo_manutencao_anual)
297     anos, meses, dias = converter_idade_para_anos_meses_dias(Simple_Payback)
298     return anos, meses, dias
299
300 dias_mes = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31]
301 custo_diesel_mes, custo_diesel_mes_ER, diferenca_diesel_mes,
        custo_inicial_total, custo_manutencao_anual, number_panels,
        number_windT_c, panel_area = calcular_custos_e_plotar(
302     file_paths, dias_mes, gasto_24, gasto, percentagem_solar,
        percentagem_eolica,
303     area_painel, pmax, solar_eficiencia, panel_price, windTmax, area_varrida,
        wind_eficiencia, wind_cp, windturbine_price, custo_inversorsolar,
        eff_inv, custo_inversoreolico, eff_inveolico, controlador_preco)
304 lifetime_project=10
305 custo_diesel_ano = np.sum(custo_diesel_mes)
306 custo_diesel_ano_ER = np.sum(custo_diesel_mes_ER)
307 diferenca_diesel = np.sum(diferenca_diesel_mes)
308 reducao_percentual = 100 - ((custo_diesel_ano_ER/custo_diesel_ano)*100)
309 ROI = calcular_ROI(diferenca_diesel, custo_inicial_total,
        custo_manutencao_anual, lifetime_project)
310 anos, meses, dias = calcular_tempo_recuperacao(custo_inicial_total,
        diferenca_diesel)
311 print(f"-----Escolha manual das energias

```

```

-----")
312 print(f"Percentagem de Energia Solar: {percentagem_solar*100:.2f}%, Energia
      Eolica: {percentagem_eolica*100:.2f}%")
313 print(f"0 numero total de paineis solares: {number_panels}")
314 print(f"A area total dos paineis solares e de {panel_area:.2f} m2.")
315 print(f"0 numero total de turbinas eolicas: {number_windT_c}")
316 print(f"0 custo inicial do investimento das energias renovaveis e {
      custo_inicial_total} euros")
317 print(f"Reducao do consumo de diesel: {reducao_percentual:.2f} %")
318 print(f"Dinheiro poupado em diesel num ano: {diferenca_diesel:.2f} euros")
319 print(f"0 retorno do investimento e de {ROI:.2f}% em 10 anos.")
320 print(f"0 tempo necessario para recuperar o investimento inicial e de {anos}
      anos, {meses} meses e {dias} dias.")

321
322 percentagens_solar = np.linspace(0, 1, 101)
323 percentagens_eolica = 1 - percentagens_solar
324 # Variaveis para armazenar o melhor resultado
325 best_ROI = -float('inf')
326 best_percen_solar = None
327 best_percen_eolica = None
328 best_number_panels = None
329 best_area_panels = None
330 best_number_WindT = None
331 best_custo_inicial_total = None
332 best_diferenca_diesel = None
333 best_simple_payback = None
334 best_solar_production = None
335 best_wind_produ = None
336 best_combustiveis = None
337 # Iterar sobre as combinacoes de percentagens
338 for perc_solar, perc_eolica in zip(percentagens_solar, percentagens_eolica):
339     # Calcular os parametros com as percentagens atuais
340     percentagem_solar = perc_solar
341     percentagem_eolica = perc_eolica
342     # Calcular custos e ROI com as percentagens atuais
343     custo_diesel_mes, custo_diesel_mes_ER, diferenca_diesel_mes,
        custo_inicial_total, custo_manutencao_anual, number_panels,
        number_windT_c, panel_area, optimized_solar_energy, wind_prod,
        combustiveis = calcular_custos_e_plotar_otimize(
344     file_paths, dias_mes, gasto_24, gasto, percentagem_solar,
        percentagem_eolica,
345     area_painel, pmax, solar_eficiencia, panel_price, windTmax,
        area_varrida, wind_eficiencia, wind_cp, windturbine_price,
        custo_inversorsolar, eff_inv, custo_inversoreolico, eff_inveolico
        , controlador_preco
346     )
347     # Calcular ROI com as percentagens atuais
348     custo_diesel_ano = np.sum(custo_diesel_mes)
349     custo_diesel_ano_ER = np.sum(custo_diesel_mes_ER)
350     diferenca_diesel = np.sum(diferenca_diesel_mes)
351     reducao_percentual = 100 - ((custo_diesel_ano_ER/custo_diesel_ano)*10

```

```

0)
352     ROI = calcular_ROI(diferenca_diesel, custo_inicial_total,
        custo_manutencao_anual, lifetime_project=10)
353     # Atualizar melhores valores se o ROI atual for melhor
354     if ROI > best_ROI:
355         best_ROI = ROI
356         best_number_panels = number_panels
357         best_area_panels = panel_area
358         best_number_WindT = number_windT_c
359         best_custo_inicial_total = custo_inicial_total
360         best_diferenca_diesel = diferenca_diesel
361         best_reducao_percentual = reducao_percentual
362         best_percen_solar = perc_solar
363         best_percen_eolica = perc_eolica
364         b_simple_payback = custo_inicial_total / diferenca_diesel
365         best_simple_payback = converter_idade_para_anos_meses_dias(
            b_simple_payback)
366         anos_best, meses_best, dias_best = calcular_tempo_recuperacao(
            custo_inicial_total, diferenca_diesel)
367         best_solar_production = optimized_solar_energy
368         best_wind_produ = wind_prod
369         best_combustiveis = combustiveis
370     # Resultados finais da otimizacao
371     print(f"-----Mas a melhor solucao das energias e
        -----")
372     print(f"Melhor combinacao de percentagens - Energia Solar: {best_percen_solar
        *100:.2f}%, Energia Eolica: {best_percen_eolica*100:.2f}%")
373     print(f"0 numero total de paineis solares: {best_number_panels}")
374     print(f"A area total dos paineis solares e de {best_area_panels:.2f} m2.")
375     print(f"0 numero total de turbinas eolicas: {best_number_WindT}")
376     print(f"0 custo inicial do investimento das energias renovaveis e {
        best_custo_inicial_total} euros")
377     print(f"Reducao do consumo de diesel: {best_reducao_percentual:.2f} %")
378     print(f"Dinheiro poupado em diesel num ano: {best_diferenca_diesel:.2f} euros
        ")
379     print(f"0 tempo necessario para recuperar o investimento inicial e de {
        anos_best} anos, {meses_best} meses e {dias_best} dias.")
380     print(f"Com um retorno do investimento de {best_ROI:.2f}% em {
        lifetime_project} anos.")

```

B Anexos - Resultados

Neste apêndice são apresentadas as áreas disponíveis para a implementação do gerador híbrido tais como as restantes temperaturas, irradiância média, humidade e velocidade do vento para os diferentes meses do ano retiradas do PVGIS [75] na RCA e na Roménia. Também constam os custos mensais e as curvas de consumo-geração obtidos através do sistema dimensionado na RCA e Roménia e o sistema otimizado na Roménia.

Tabela B.1: Área disponível para implementação do gerador híbrido.

Telhado/Terreno	Área medida (m ²)	Incerteza	Área mínima (m ²)	Área máxima (m ²)
A	477	3,54 %	460	494
B	527		509	546
C	102		99	106
D	187		180	193
E	199		192	206
F	95		91	98
G	49		47	51
H	180		174	187
I	200		193	207
J	61		59	63
K	66		64	69
L	60		58	62
M	100		97	104
N	97		94	100
O	70		67	72
P	966		932	1 000
Q	194		187	201
R	195		188	202
S	170		164	176
T	92		89	96
U	73		70	75
V	192		186	199
W	308		297	319
X	366		353	379
Y	90		86	93
Z	419		404	434
A1	184		178	191
B1	208		201	216
C1	341		329	354
D1	1 472		1 420	1 524

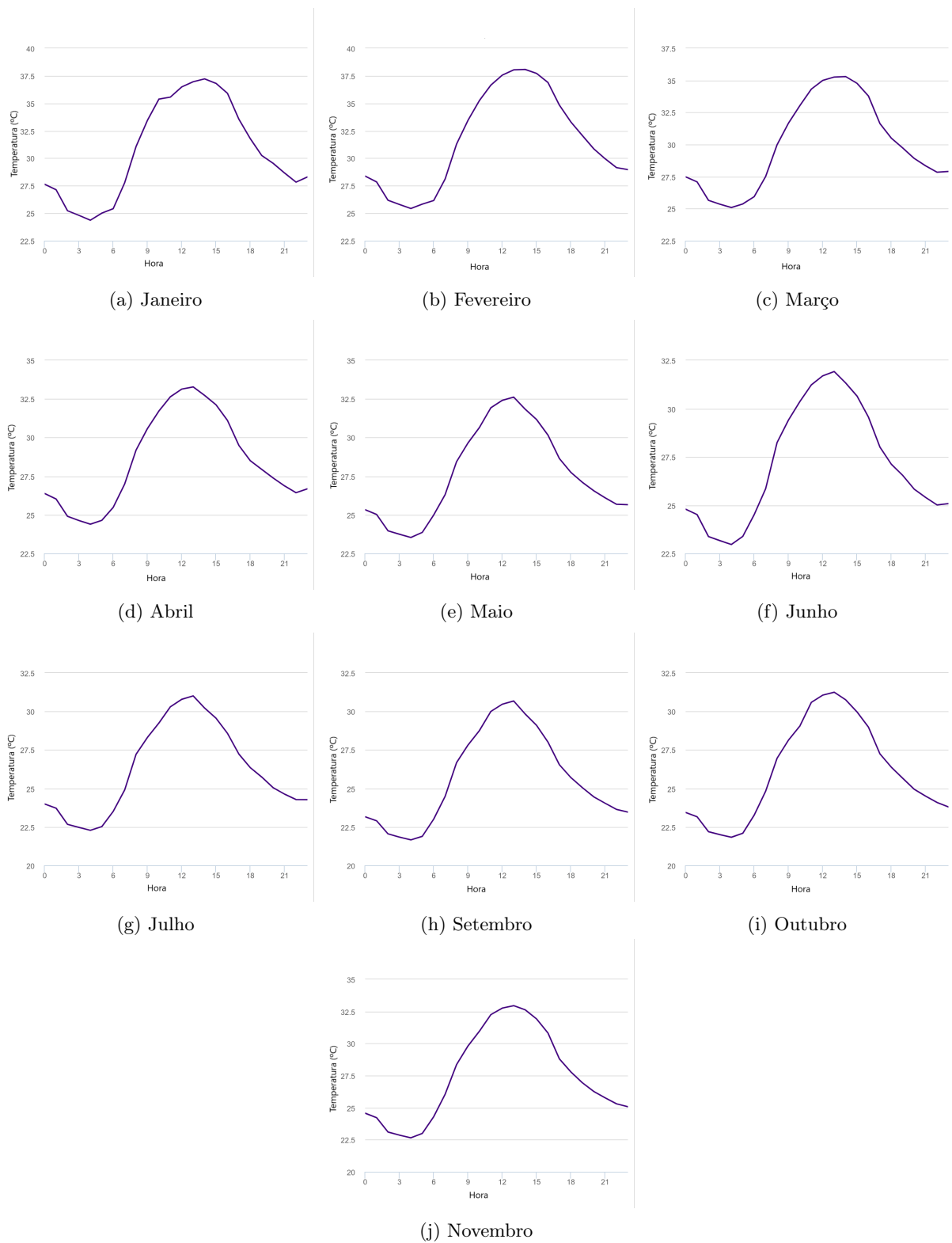


Figura B.1: Temperatura média diária para os restantes meses na RCA.

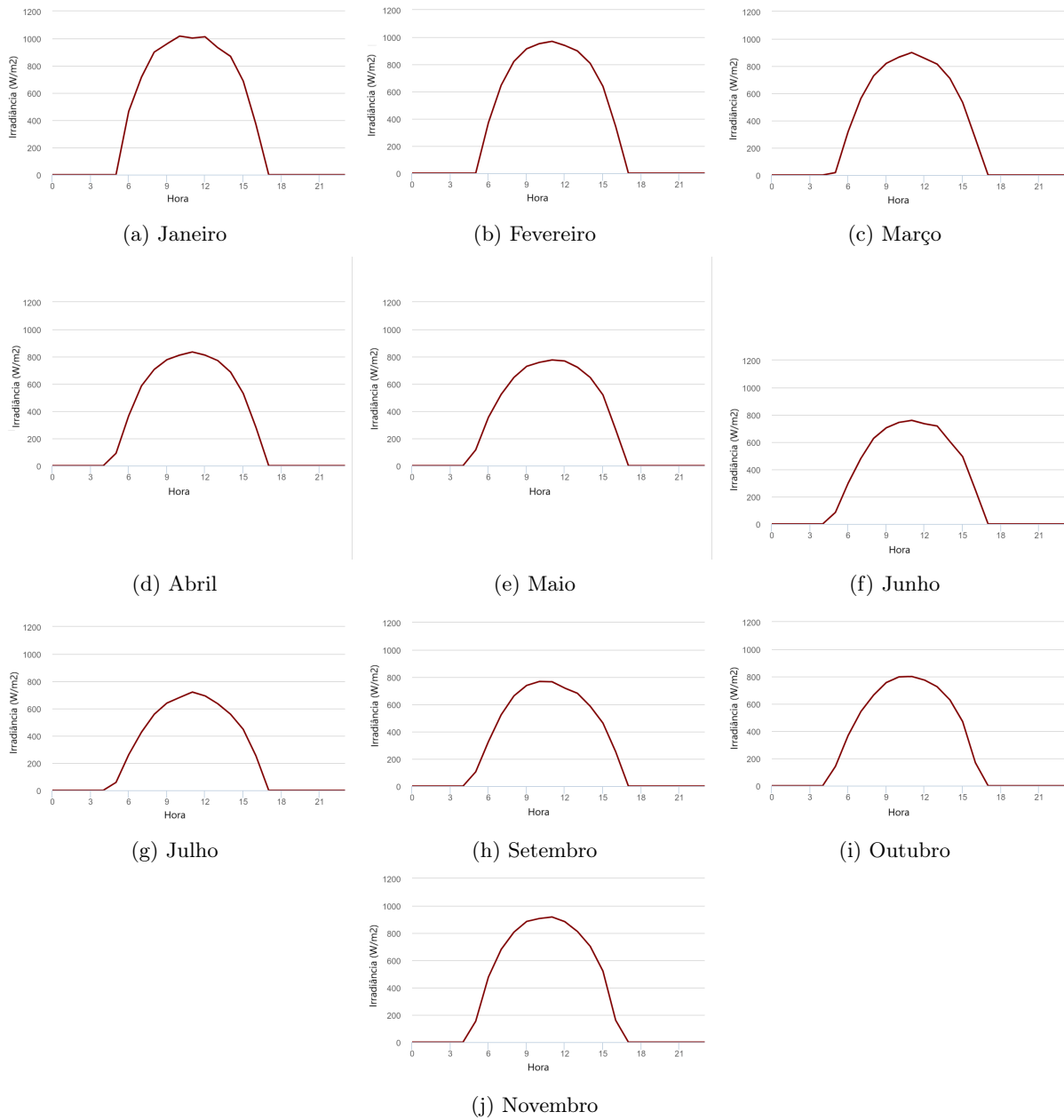


Figura B.2: Irradiância média diária para os restantes meses na RCA.

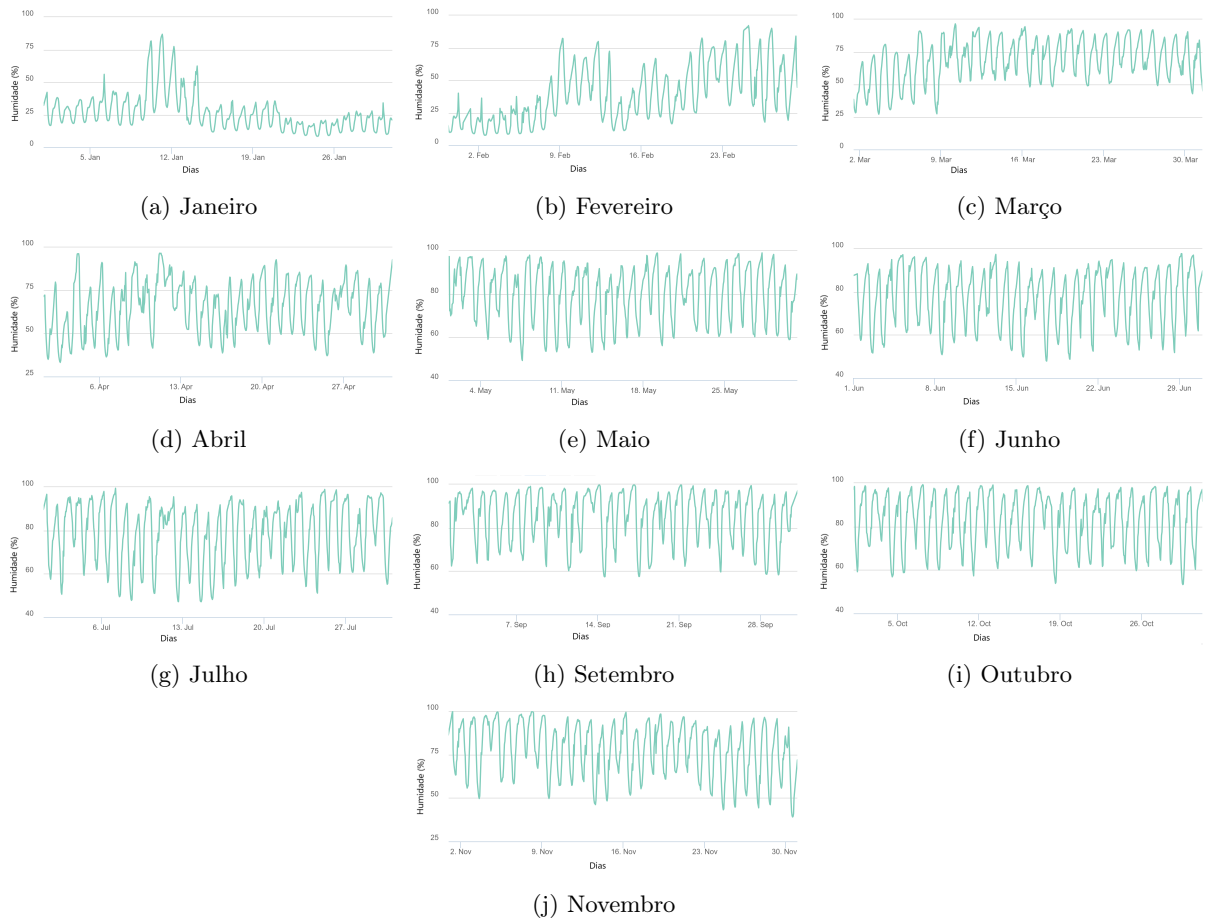


Figura B.3: Humidade ao longo dos restantes meses na RCA.

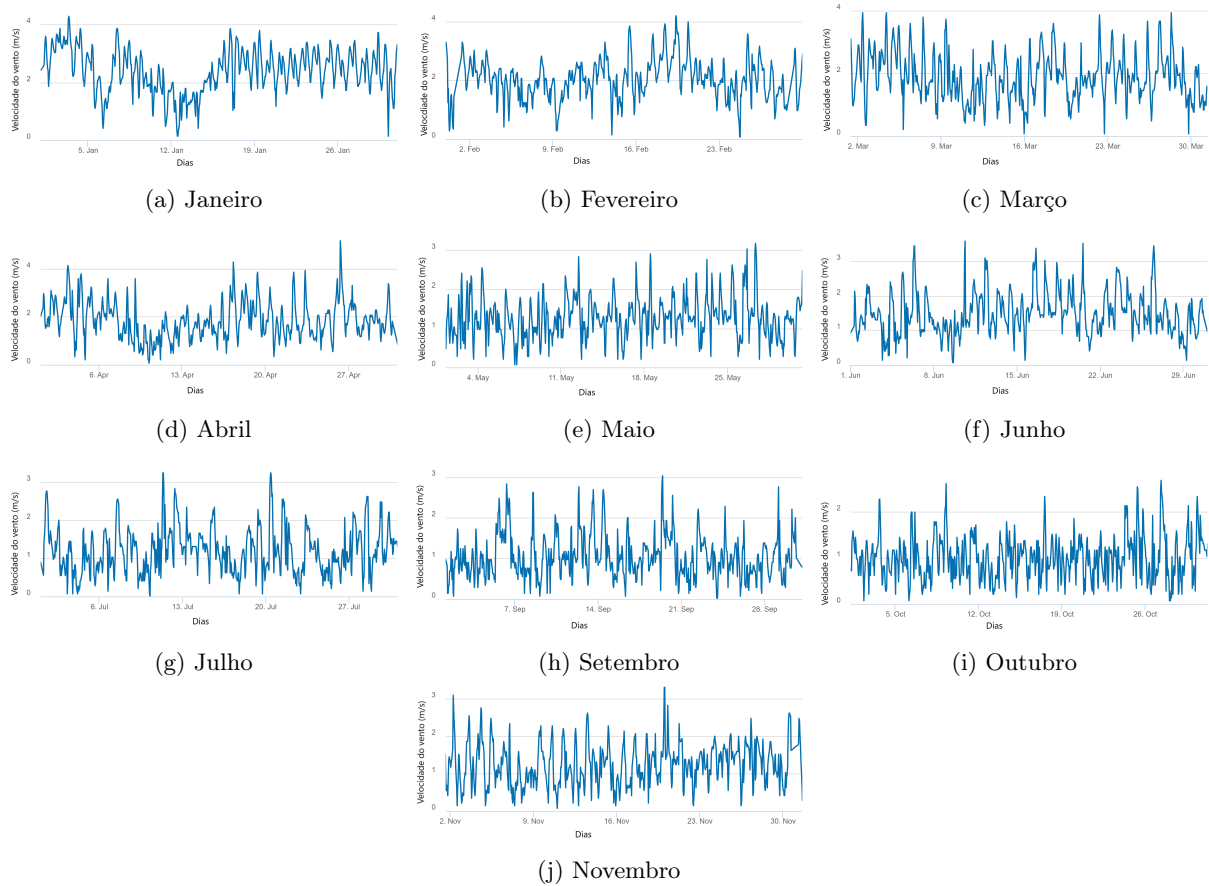


Figura B.4: Velocidade do vento ao longo dos restantes meses na RCA.

Tabela B.2: Custos mensais do sistema dimensionado na RCA.

Mês	Custo de diesel/dias/ERs (Milhares de €)	Custo de diesel/dia c/ERs (€)	Montante economizado/mês (Milhares de €)
janeiro	1,346	913	13,423
fevereiro		865	13,468
março		911	13,485
abril		913	12,990
maio		934	12,772
junho		960	11,580
julho		997	10,819
agosto		1 000	10,726
setembro		964	11,460
outubro		938	12,648
novembro		894	13,560
dezembro		848	15,438

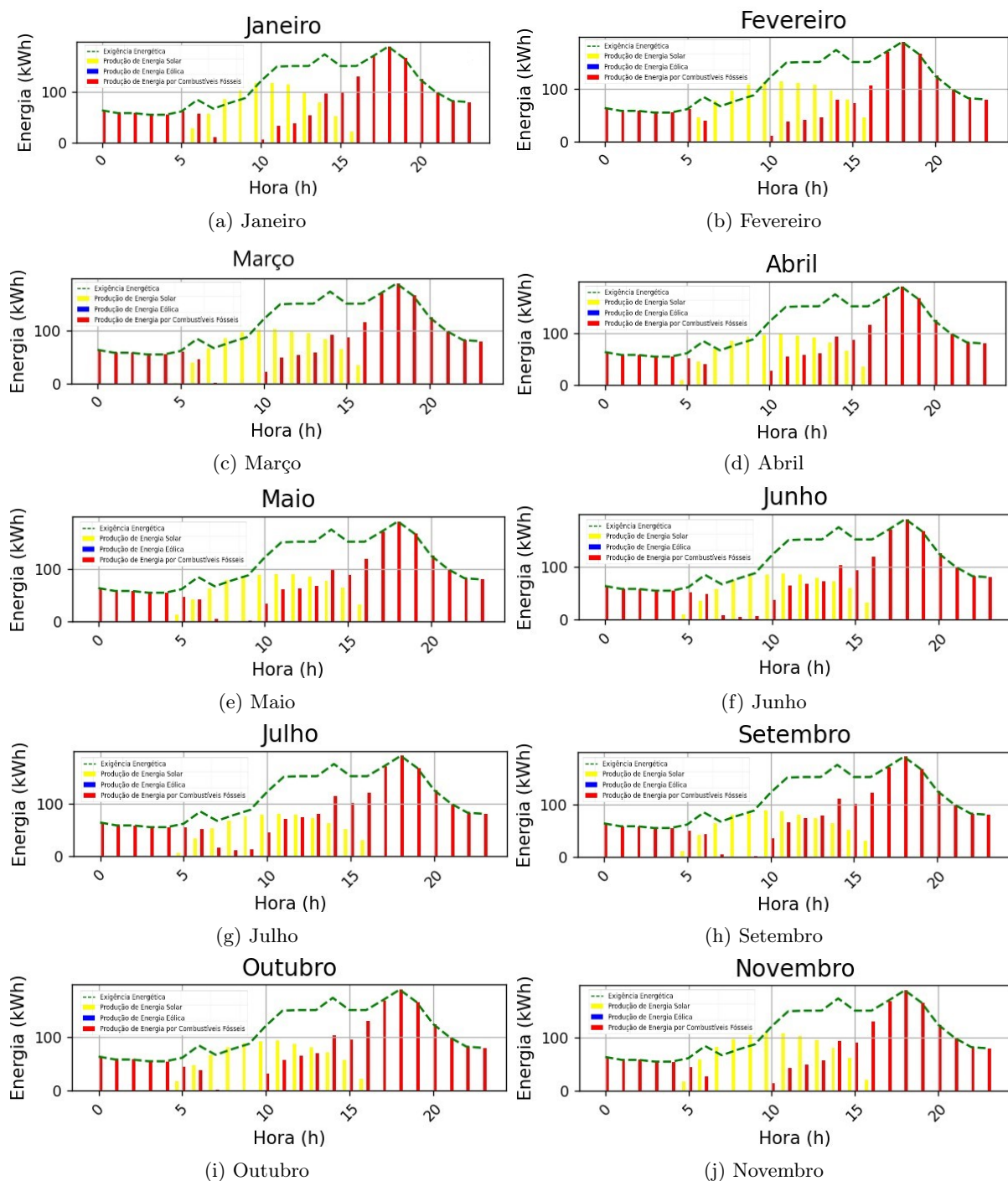


Figura B.5: Curvas consumo-geração dos restantes meses na RCA.

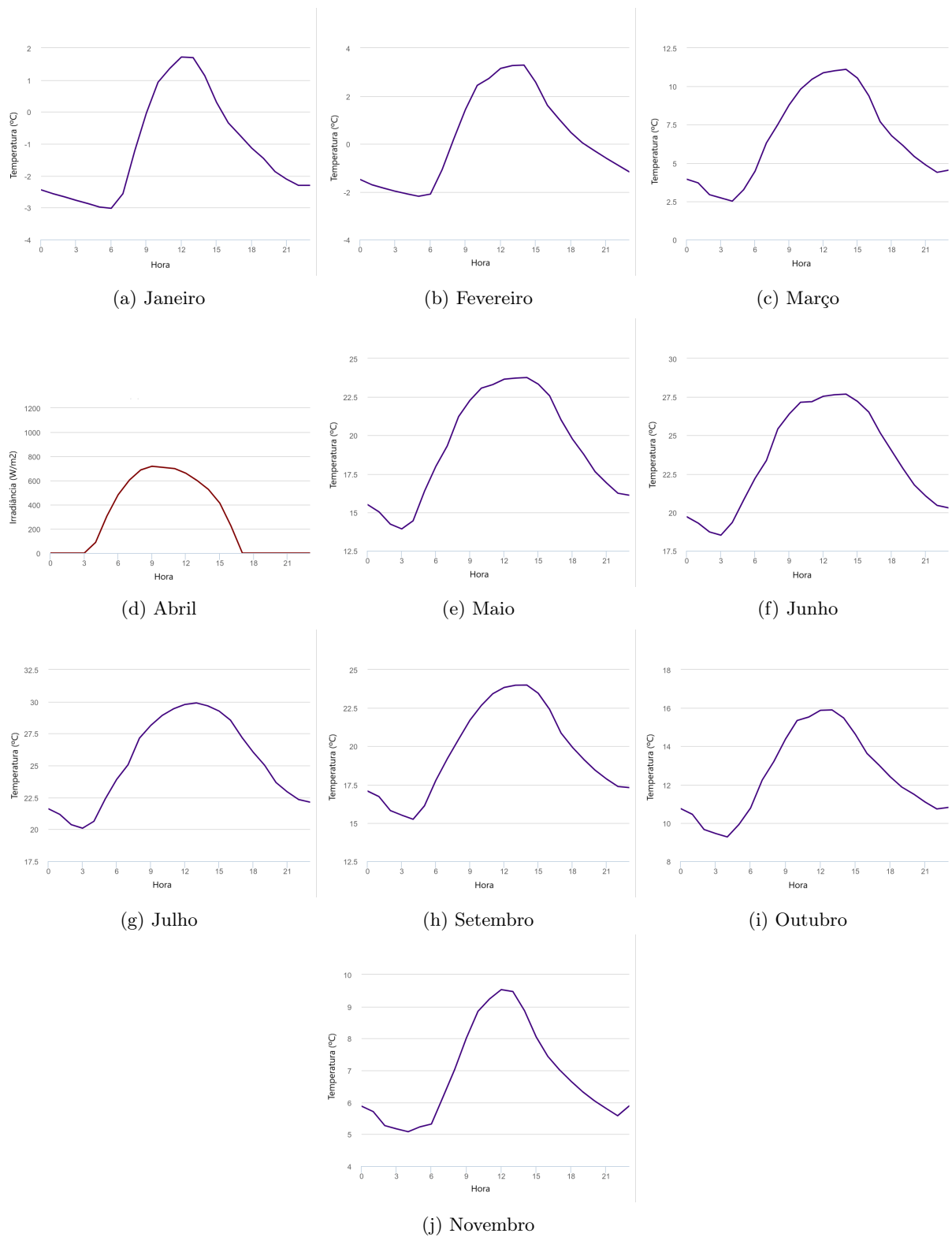


Figura B.6: Temperatura média diária para os restantes meses na Roménia.

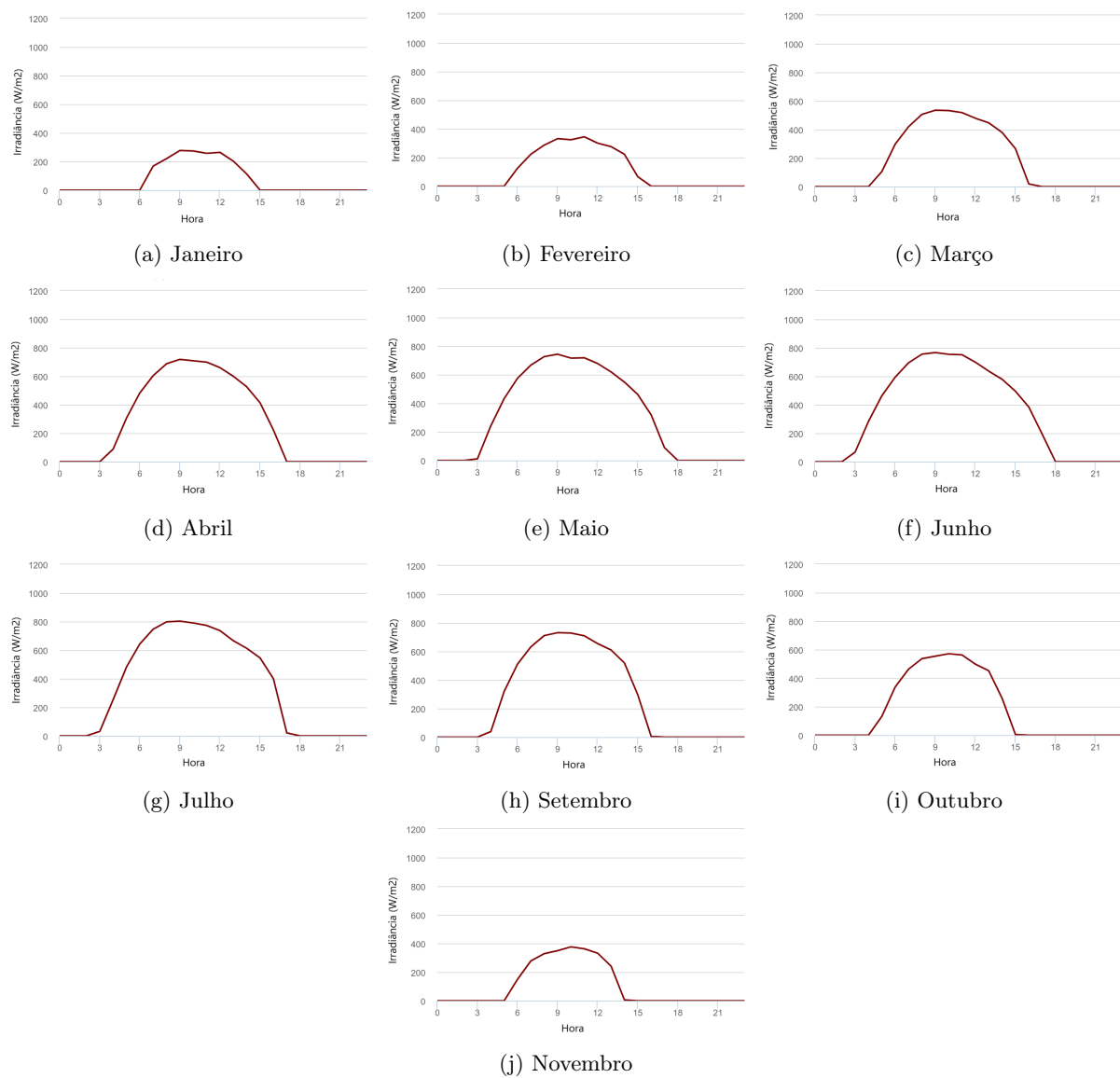


Figura B.7: Irradiância média diária para os restantes meses na Roménia.

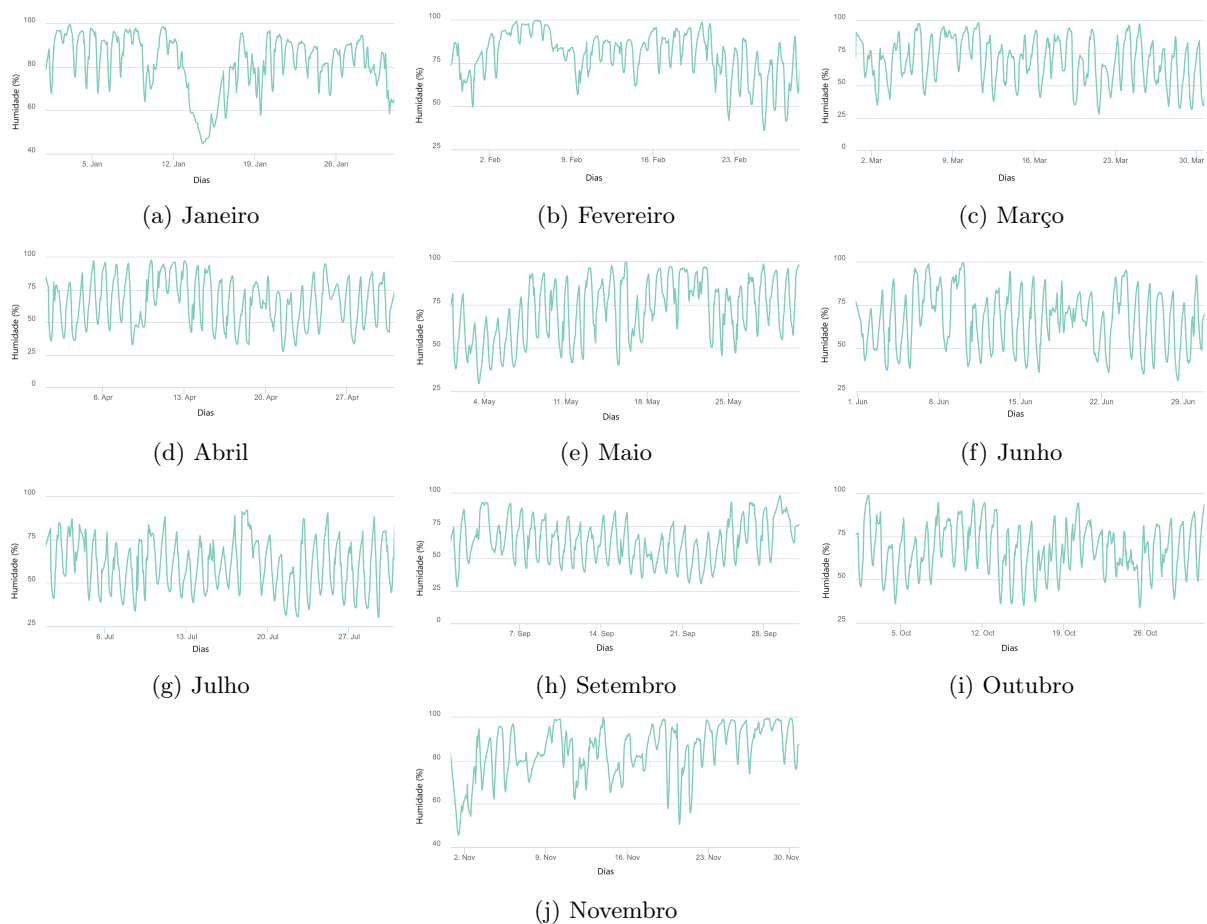


Figura B.8: Humidade ao longo dos restantes meses na Roménia.

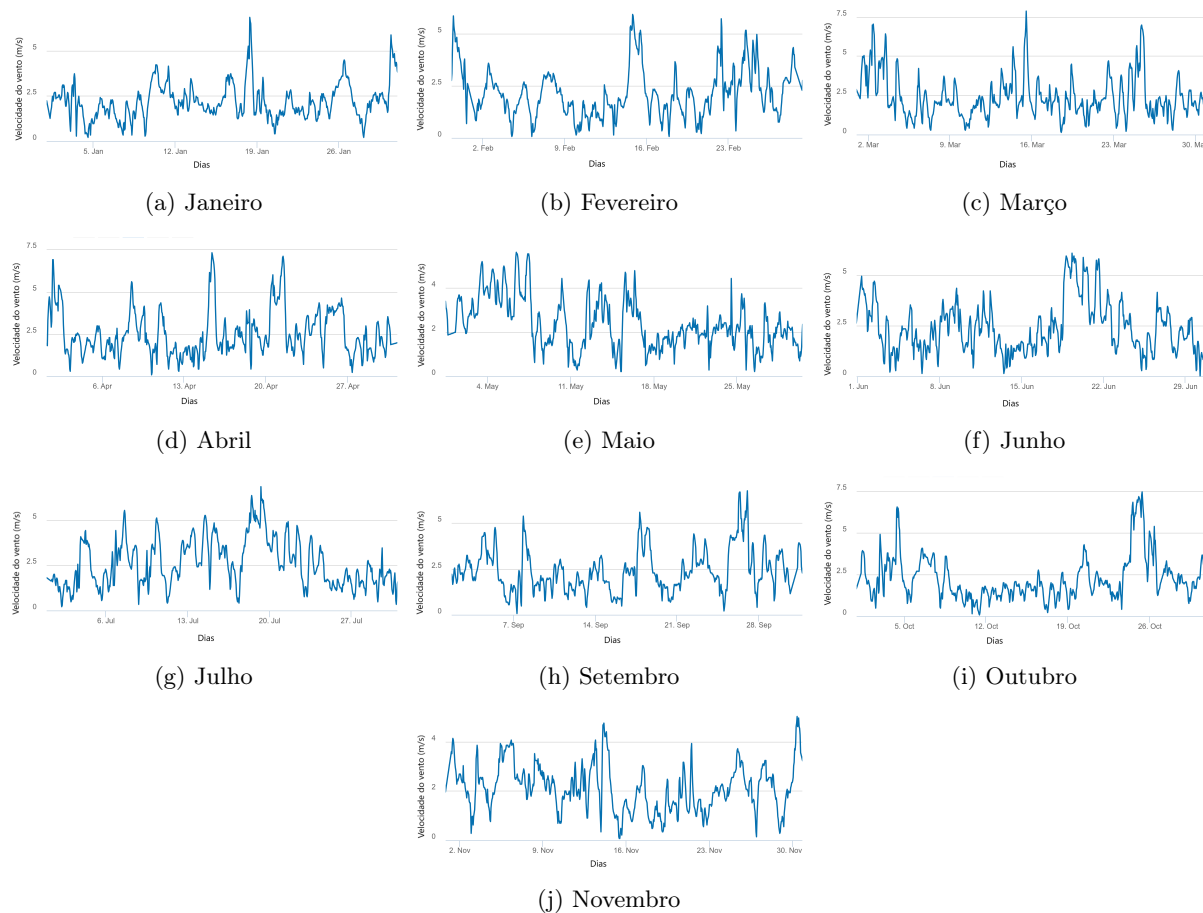


Figura B.9: Velocidade do vento ao longo dos restantes meses na Roménia.

Tabela B.3: Custos mensais com o sistema dimensionado e o sistema otimizado na Roménia.

Mês	Custo de diesel/dias/ERs (Milhares de €)	Custo de diesel/dia c/ERs (€)		Montante economizado/mês (Milhares de €)	
Sistema	Dimensionado e Ótimo	Dimensionado	Ótimo	Dimensionado	Ótimo
janeiro	1,010	882	425	3,968	18,135
fevereiro		870	421	3,920	16,492
março		760	383	7,750	19,437
abril		685	361	9,750	19,470
maio		660	355	10,850	20,832
junho		631	346	11,370	19,920
julho		611	338	12,369	20,832
agosto		635	344	11,625	20,646
setembro		701	366	9,270	19,320
outubro		776	390	7,254	19,220
novembro		874	423	4,080	17,610
dezembro		895	432	3,565	17,918

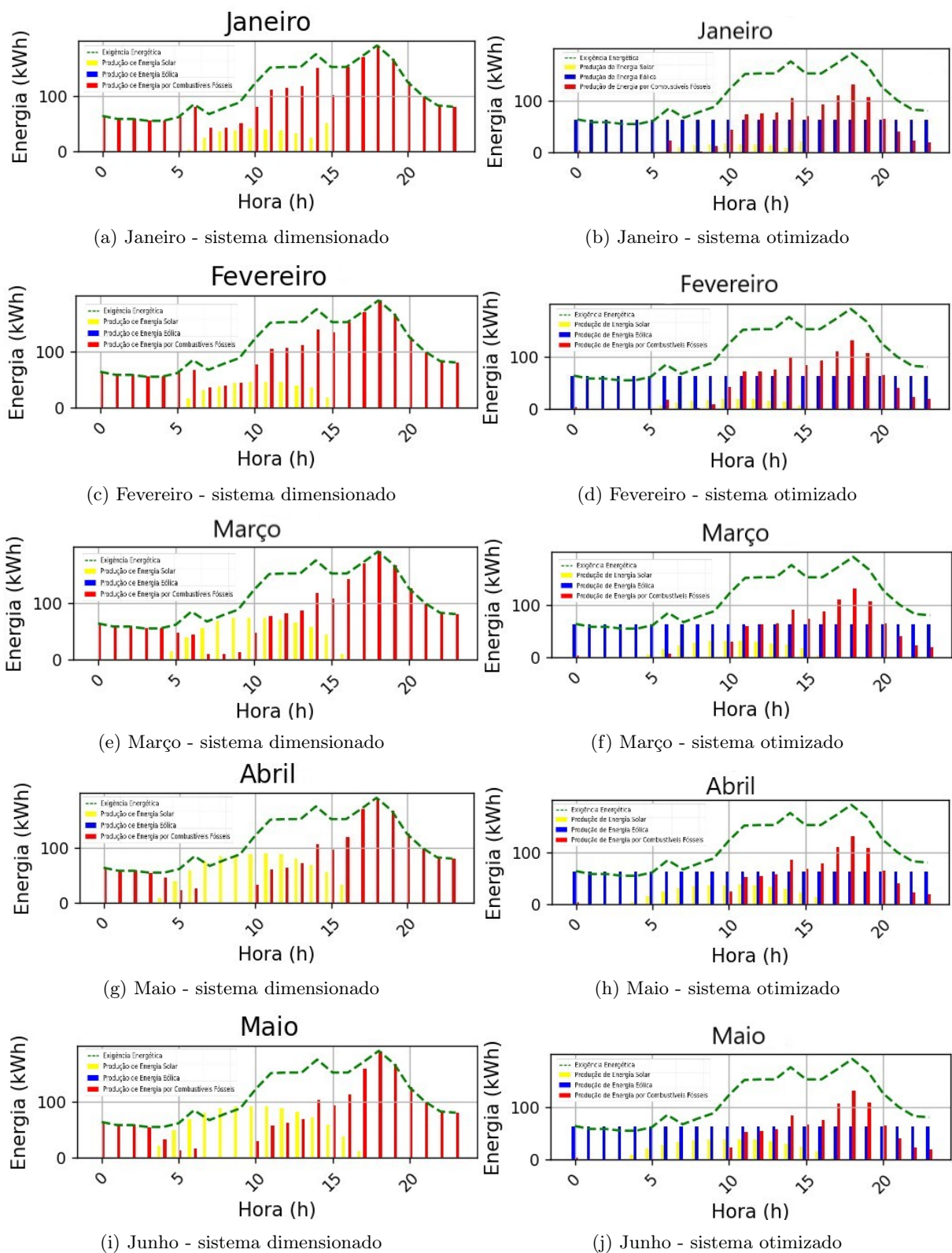


Figura B.10: Curvas consumo-geração do sistema dimensionado e do sistema otimizado dos restantes meses na Roménia.

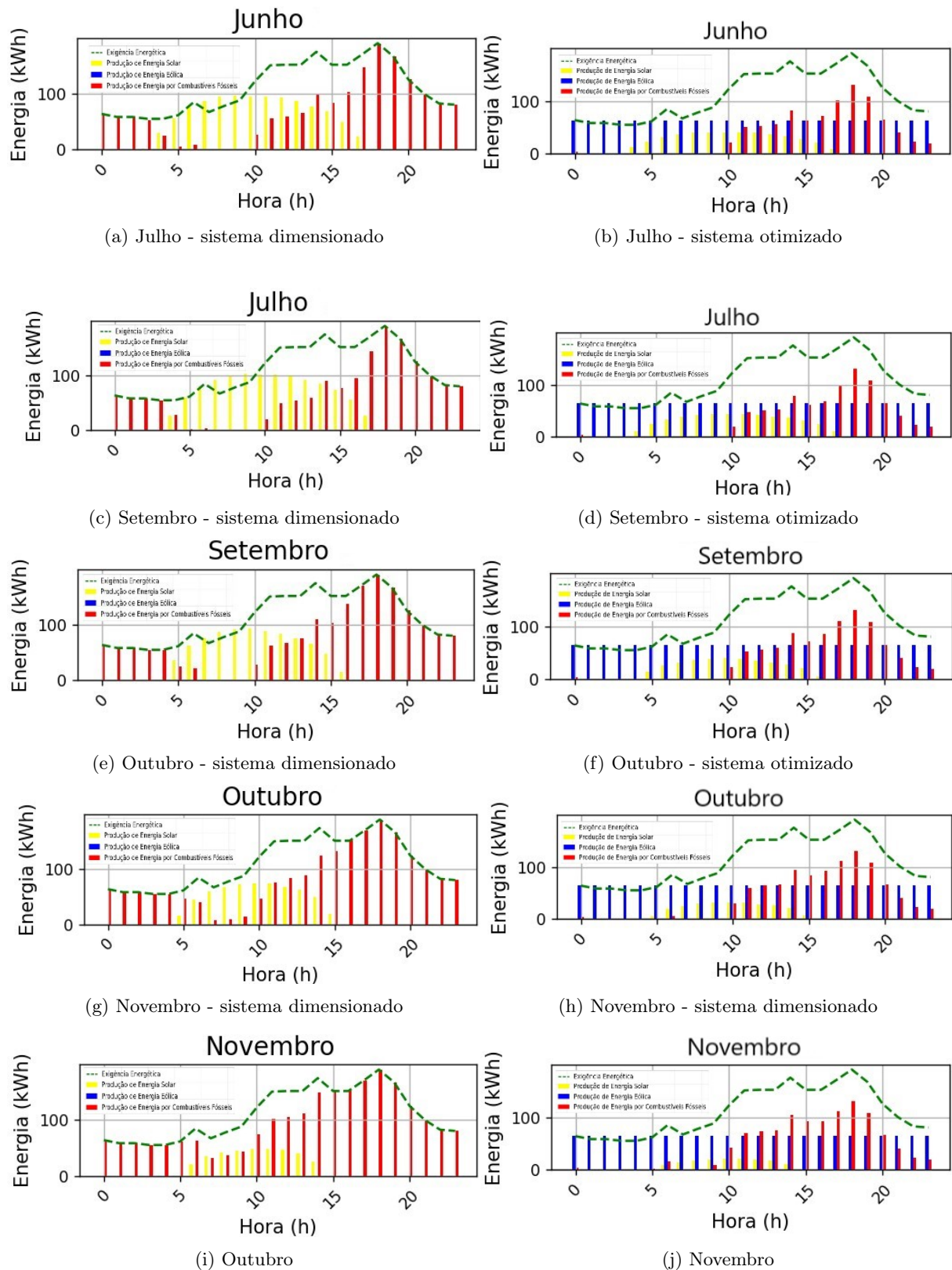


Figura B.11: Curvas consumo-geração do sistema dimensionado e do sistema otimizado dos restantes meses na Romênia - continuação.