

Aplicação de energias renováveis a sistemas de contentores militares

Por Engenho e Ciência



Autor: Alferes-Aluno de Transmissões Simão Amaral Neves, Academia Militar, Lisboa, Portugal -
Dissertação de Mestrado (Master of Science) em Engenharia Electrotécnica Militar com especialização em
Telecomunicações – concluído em Dezembro de 2024.

Orientação de [Professor Assistente Pedro Santos](#) (PhD) e do [Professor Assistente João Torres](#) (PhD), ambos do
Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa,

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.

O presente trabalho 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.

Quanto ao estado da arte, o objetivo deste capítulo é apresentar diferentes estudos realizados no contexto da aplicação de energias renováveis em sistemas de contentores militares, com ênfase na implementação de sistemas híbridos de energia para esses contentores. Na metodologia adotada para este estudo inicialmente são definidos os métodos e ferramentas necessários 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.

Introdução

O desenvolvimento de soluções inovadoras alinhadas a práticas sustentáveis é essencial, especialmente no meio militar, onde a adoção de Energias Renováveis (ER) oferece diversas vantagens. As ER, como solar, eólica e hidráulica, são fontes limpas e sustentáveis que podem alimentar sistemas de contentores militares, reduzindo a pegada de carbono, os custos logísticos e os riscos de segurança associados ao transporte de combustíveis. Além disso, elas garantem maior eficiência operacional, viabilizando operações ininterruptas e sustentando equipamentos essenciais, como sistemas de comunicação e iluminação. A aplicação de ER em locais remotos, onde a energia elétrica é escassa, destaca sua importância para a sustentabilidade e eficiência das operações militares.

Metodologia

O trabalho 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 Forças Nacionais Destacadas. 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.

A. Painéis Solares

As células solares que irão ser alvo de análise são as do 1M3P. A corrente de saída, I , pode ser calculada em função da tensão de saída, V , através da seguinte equação [1], [2]:

onde a corrente do díodo é dada por:

$$I = I_{fv} - I_d \quad (1)$$

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V}{bV_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

sendo I_{fv} a corrente fotovoltaica, b o fator de não idealidade do díodo, I_o a corrente de saturação do díodo, V_T correspondente à tensão térmica que pode ser calculada através da equação 3, onde T é a temperatura, k a constante de Boltzmann e q o módulo da carga do eletrão:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

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 [1]:

- 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:

$$I_o(T) = I_o \left(\frac{T}{T_r} \right)^{\frac{E_g}{b}} e^{\frac{E_g}{b} \left(\frac{1}{V_T} - \frac{1}{V_{T_r}} \right)} \quad (4)$$

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

$$I_{cc} = \frac{G}{G_r} I_{cc_r} \quad (5)$$

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 [1]:

$$V_{\text{Painel}} = m \cdot V_{\text{Célula}} \quad (6)$$

$$I_{\text{Painel}} = n \cdot I_{\text{Célula}} \quad (7)$$

$$P_{\text{Painel}} = z \cdot V_{\text{Célula}} = (m \cdot n) \cdot P_{\text{Célula}} \quad (8)$$

B. 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 a potência nominal, orientação do eixo, área varrida, A_r , velocidade do vento na qual a turbina é operacional, eficiência da turbina, η_{te} , e coeficiente de potência, c_p .

É importante lembrar 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:

em que:
$$P_t = P_w \cdot \eta_{te} \quad (9)$$

$$P_w = \frac{\rho_{ar}}{2} c_p(\lambda) A_r v_w^3 \quad (10)$$

A Produção Anual de Energia (PAE), refere-se à totalidade de 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 [3]. Este cálculo é realizado através da aplicação da curva de potência da turbina em combinação com a distribuição anual do vento.

$$PAE_t = T_{anual} \int_{\theta_0}^{\theta_{360}} \int_{v_{w0}}^{v_{w\infty}} P_w(v_w) f_{vw}(v_w) dv d\theta \quad (11)$$

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:

$$PAE_{total} = N_t \cdot PAE_t \quad (12)$$

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.

C. 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.

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 PVGIS e do *software* HOMER Pro.

2. Dimensionamento da Carga

Para realizar o dimensionamento do sistema em causa, é necessário conhecer o valor do consumo médio mensal de uma Força Nacional Destacada (FND). Esse valor será 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.

D. 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 [4]:

$$ROI = \frac{GFin - CFin}{CFin} \quad (13)$$

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 [5]. O PRI pode ser obtido utilizando a equação 14.

$$PRI = \frac{I_0}{GP} \quad (14)$$

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 diesel 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 reque- rem 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.

Para determinar a solução mais eficiente e adequar as fontes de ER ao campo, foi desenvolvido um algoritmo de otimização para calcular a melhor configuração para o projeto. Após obter os resultados, o algoritmo itera sobre diferentes combinações de percentagens de energias solar e eólica, calculando para cada combinação o respetivo ROI. No final deste ciclo de iterações, é selecionada a combinação com o ROI mais elevado. Em seguida, o algoritmo recalculará os resultados para confirmar a solução ótima.

Resultados

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

A. Painéis Solares

O painel solar considerado e disponível para o desenvolvimento deste projeto é o modelo SZ-100-33MF [6] 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. Os parâmetros do painel solar SZ-100-33MF [6] podem ser observados na Tabela I.

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

Tabela I: Parâmetros do painel solar SZ-100-33MF [6]

B. Turbinas Eólicas

A turbina eólica escolhida para o dimensionamento do sistema foi a Aeolos-V 10kW [7]. 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. Na Tabela II pode-se observar os parâmetros da turbina eólica Aeolos-V 10kW.

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 [8]	2,5	15

Tabela II: Parâmetros da turbina eólica Aeolos-V 10kW [7]

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

Através da ferramenta *Google Earth*, 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% [9]. A Figura 1 ilustra as áreas passíveis de instalação dos painéis solares e das turbinas eólicas.



Figura 1: Medição da área disponível para o gerador

A área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos varia entre 6 048 m² e 6 493 m², a amarelo, e a azul, para a instalação das turbinas eólicas, está compreendida entre 1 420 m² e 1 524 m².

1. Análise Climatológica

Para a análise climática da RCA, foram recolhidas variáveis como a temperatura, a irradiância, a velocidade do vento e a humidade.

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 outros dois servem de reserva (geradores internos) em caso de situações de falha ou necessidade de energia extra. O consumo médio por hora é cerca de 110 kWh o que corresponde a um consumo médio diário de 2 640 kWh/dia. A Figura 2 apresenta o consumo médio por hora do campo na RCA, com base nas variações percentuais do estudo [10].

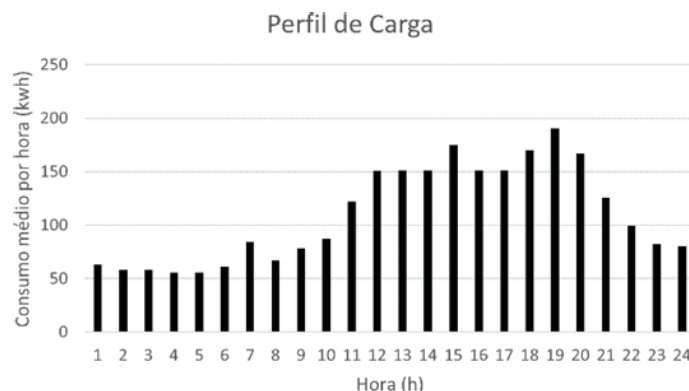


Figura 2: Consumo médio por hora

D. Dimensionamento do Sistema

Com base nos parâmetros apresentados anteriormente e nos restantes valores indicados na Tabela III, foi calculado o dimensionamento ótimo do sistema através do Algoritmo de Otimização. A manutenção anual do sistema corresponde a aproximadamente 1,5% do I0 com base num projeto publicado pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) [11] e o preço do diesel por litro foi considerado 2€. Os resultados obtidos estão presentes na Tabela IV.

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 III: Restantes parâmetros para o 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 <i>diesel</i> anualmente (%)	31
Montante economizado anualmente (Milhares de €)	152,369
ROI máximo	378% em 10 anos
PRI mínimo	1 ano e 10 meses

Tabela IV: Resultados do dimensionamento do gerador híbrido

Para esta configuração e localização em análise, foram elaboradas as curvas médias diárias de produção de energia do gerador fotovoltaico e podem ser observadas nas Figuras 3 e 4.

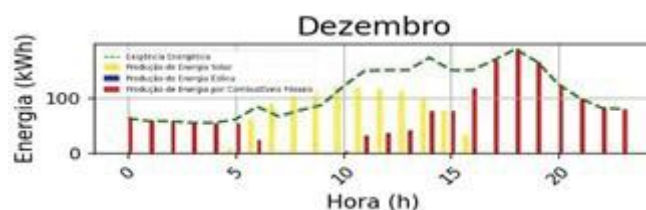


Figura 3: Curva consumo-geração do mês de dezembro na RCA

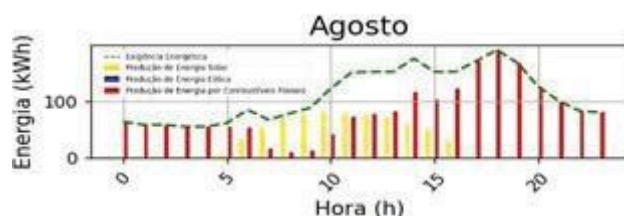


Figura 4: Curva consumo-geração do mês de agosto na RCA

Turbinas eólicas em Bangui são inviáveis devido ao vento inadequado e altos custos. Já os painéis solares são viáveis, pois o telhado disponível acomoda o gerador fotovoltaico necessário, garantindo integração eficiente.

1. Sistema ótimo na Romênia

A escolha da Romênia como local de estudo deve-se ao fato de ser um Teatro de Operações ativo e possuir um clima mais frio, com baixa irradiação solar e ventos mais intensos, contrastando com o clima quente e de alta irradiação da República Centro-Africana (RCA). O sistema previamente dimensionado foi testado na Romênia utilizando o Algoritmo de Otimização, sem adaptações específicas para a região, exceto pela análise climatológica e o preço do gasóleo, considerado em 1,5€/litro. As mesmas variáveis climáticas foram analisadas para a Romênia e a RCA, com os resultados apresentados na Tabela V.

	Sistema dimensionado	Sistema otimizado
Energia solar (%)	100	44
Energia eólica (%)	0	56
Nº de painéis solares	1 100	484
Área total de painéis solares (m²)	621	273
Nº de turbinas eólicas	0	26
I_0 (Milhares de €)	277,350	521,974
Redução do consumo de <i>diesel</i> 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

Tabela V: Resultados do dimensionamento do gerador híbrido na Romênia

Nas Figuras 5 e 6 é possível observar as curvas de consumo-geração do sistema otimizado implementado na Romênia para os meses de dezembro e agosto.

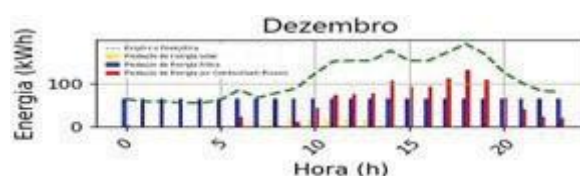


Figura 5: Curva consumo-geração do sistema otimizado para o mês de dezembro na Romênia

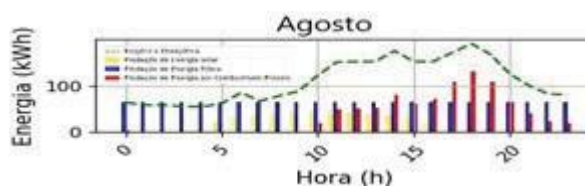


Figura 6: Curva consumo-geração do sistema otimizado para o mês de agosto na Romênia

Conclusão

A integração de ER no meio militar melhora a sustentabilidade, eficiência e autonomia operacional das FNDs. Este estudo demonstrou que sistemas híbridos solares e eólicos reduzem custos, dependência de combustíveis fósseis e logística, sendo viáveis em diferentes cenários. A adaptação de contentores militares para ER destaca sua flexibilidade, aumentando a resiliência e segurança energética.

Referências

- [1] R. A. Marques Lameirinhas, J. P. N. Torres & J. P. de Melo Cunha, *A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications Energies*, vol. 15, n.º 5, p. 1823, March, 2022.
- [2] A. Khatibi, F. R. Astarai and 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, fevereiro, 2019.
- [3] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2ª ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, março, 2011
- [4] P. Andru e A. Botchkarev, *The Use of Return on Investment (ROI) in the Performance Measurement and Evaluation of Information Systems*, janeiro, 2011
- [5] 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.
- [6] Datasheet of SZ-100-33MF, <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/4l13tku587i0o/bea9d45b752ef1fe14ad60b9a5d6f01f2.pdf>, Acedido: 22 de março de 2024.
- [7] Datasheet of Aeolos-V 10kW, [https://abei.ch/wp-content/uploads/2023/02/Aeolos-V 10kW-Brochure-1.pdf](https://abei.ch/wp-content/uploads/2023/02/Aeolos-V-10kW-Brochure-1.pdf), Acedido: 22 de julho de 2024.
- [8] 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.
- [9] 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*, janeiro, 2011.
- [10] M. Engels, P. Boyd, T. Koehler et al., *Smart and Green Energy (SAGE) for Base Camps Final Report*, rel. téc., fevereiro, 2014.
- [11] 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.