

DESCARBONIZAR MICRO/MINI-REDES ATRAVÉS DA COMPLEMENTARIDADE DA PRODUÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA

Couto A*, Cardoso J.P.*, Simões T.*, Estanqueiro A.*, Stevanato N.***, Mereu, R.**

* Unidade de Energias Renováveis e Integração de Sistemas de Energia, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), I.P., Estrada do Paço do Lumiar nº22, Lisboa, 1649-038 Portugal, antonio.couto@lneg.pt, joao.cardoso@lneg.pt, teresa.simoed@lneg.pt, ana.estanqueiro@lneg.pt

**Politecnico di Milano (POLIMI), via Lambruschini, 4 – 20156 – Milano, Italia, nicolo.stevanato@polimi.it, riccardo.mereu@polimi.it

RESUMEN/RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para determinar a capacidade instalada ótima de fontes de energia renováveis variáveis no tempo, numa mini-rede selecionada, e avaliar o potencial destas tecnologias para satisfazer o consumo de eletricidade, permitindo reduzir a dependência de geradores alimentados por combustíveis fósseis. A capacidade ótima é identificada com base na exploração estratégica da sinergia eólica e solar fotovoltaica (FV) para atender à procura de eletricidade, neste caso, para substituir a produção com geradores a diesel. Para este efeito, neste trabalho, explora-se o uso de diferentes ângulos de azimute e inclinação dos sistemas solares fotovoltaicos fixos (convencionais e bifaciais), bem como sistemas com seguimento para criar um portfólio de geração ideal. Os resultados preliminares obtidos destacam que é necessário diversificar a orientação dos painéis solares e explorar a energia eólica para evitar vários períodos com excesso de produção e, conseqüentemente, corte de geração. Apesar de ser necessário continuar a desenvolver este trabalho, os resultados mostram que o uso dos geradores a diesel pode ser significativamente reduzido, especialmente durante o período diurno.

PALABRAS CLAVE/PALAVRAS-CHAVE:

Energia Solar Fotovoltaica, Energia Eólica, Sistemas híbridos, Complementaridade de Recursos, Mini-redes

ABSTRACT

This work presents a methodology to determine the optimal share of variable renewable energy sources (vRES) in a selected mini-grid, and evaluate its ability to satisfy electricity demand, allowing to reduce dependence on generators using fossil fuel. The optimal share is identified based on the strategic exploitation of wind and solar photovoltaic (PV) synergies to meet electricity demand, in this case, to replace the production from diesel generators. To this end, in this work, the use of different azimuth and tilt angles for solar PV systems (conventional and bifacial) as well as tracking systems to create an ideal mix is explored. The preliminary results obtained highlight that it is necessary to diversify the orientation of solar panels and explore wind energy to avoid several periods of generation outages. Although it is necessary to continue developing this work, the results show that the use of diesel generators can be significantly reduced, especially during the day.

KEYWORDS: Photovoltaic Solar Energy, Wind Energy, Hybrid Renewable Systems, Resources Complementarity, Mini-grids

INTRODUÇÃO

O acesso à eletricidade é considerado um dos atributos básicos da vida moderna. Este acesso é essencial para a produção de bens e serviços e a garantia de uma melhor qualidade de vida. A realidade é que, em África, o acesso à eletricidade é ainda muito reduzido em vários países, e a qualidade do fornecimento quer ao setor de serviços quer ao setor doméstico é ainda extremamente precário. Este facto é motivado por vários fatores, entre eles a escassez e robustez da infraestrutura elétrica, motivando cortes frequentes do fornecimento de eletricidade nas zonas em que esta já existe (Mensah, 2024).

Vários esforços têm vindo a ser feitos nos últimos anos, por via, por exemplo, da criação dos objetivos de desenvolvimento sustentável (SDG) pelas Nações Unidas, neste caso o SDG7 (*Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all*), tendo-se já verificado alguns resultados positivos nesta matéria por parte de vários países Africanos (Jayachandran, Gatla, Rao, et al., 2022). Ainda assim, de acordo com o CSIS (*Center for Strategic & International Studies*), sem uma intervenção significativa, o fornecimento de energia em África não irá acompanhar a procura provocada pelo crescimento populacional, desenvolvimento urbanístico e crescimento económico, sendo que, até 2050 se prevê que África contenha 5 dos 8 países mais populosos do mundo (Baskaran e Coste, 2024).

O recurso a fontes de energias renováveis (FER), tem-se revelado como uma das soluções para a problemática da energia, havendo, no entanto, ainda, um longo caminho pela frente. De acordo com Agência Internacional de Energia para além do recurso a FER, um dos caminhos para aumentar o acesso à eletricidade em países africanos até 2030 passa pela implementação de sistemas de produção de energia descentralizados isolados e mini-redes, estimando que por estas vias, se conseguirá chegar a quase 60% das habitações atualmente sem eletricidade, especialmente em áreas rurais, onde reside o maior problema (IEA, 2023). Adicionalmente, garantir o acesso a opções modernas de energia limpa terá um impacto na vida das pessoas devido às novas oportunidades económicas e empregos, ao empoderamento dos cidadãos, à melhoria da educação, da saúde e dos serviços financeiros, e comunidades mais sustentáveis e inclusivas, enquanto contribui para mitigar o impacto das mudanças climáticas (ESMAP, 2022; USAID e Africa Power, 2021).

Desta forma, as mini-redes surgem como uma solução eficiente e económica para fornecer energia nas áreas rurais, podendo ser flexíveis e modulares, e, futuramente, integradas na rede nacional (Zebra, van der Windt, Nhumaio, et al., 2021). O interesse crescente por este tipo de redes surge da necessidade de oferecer uma alternativa à rede elétrica convencional e impulsionar o crescimento da geração de energia distribuída, com destaque para as FER variáveis no tempo, como as tecnologias solar fotovoltaica (FV) e eólica, e a integração de sistemas de armazenamento. Adicionalmente, os custos associados a estas tecnologias diminuíram significativamente nos últimos anos, tornando as mini-redes ainda mais atrativas para a eletrificação em áreas rurais (Mbinkar, A. Asoh, Tchuidjan, et al., 2021).

No entanto, FER variáveis no tempo, como a energia solar FV e eólica, são dependentes das condições atmosféricas e, como tal, apresentam uma elevada variabilidade espacial e temporal. Esta característica acarreta vários desafios para a integração segura e robusta dessas fontes no sistema de energia/mini-rede. Assim, para integrar adequadamente as FER variáveis no tempo numa mini-rede, é crucial, entre outros, explorar a capacidade dessas tecnologias em reduzir a produção de eletricidade com combustíveis fósseis, contribuindo para a descarbonização deste tipo de redes e, simultaneamente, criar sinergias para mitigar as limitações inerentes às diferentes tecnologias. Efectivamente, se estrategicamente instaladas podem igualmente reduzir a necessidade de medidas de flexibilidade. Tal pode ser alcançado através da complementaridade da geração, *i.e.*, a combinação sinérgica dos diferentes perfis de geração das FER (Couto e Estanqueiro, 2020).

Este trabalho propõe uma metodologia para identificar estrategicamente as capacidades ótimas a instalar de tecnologia solar FV e eólica para atender à procura de energia elétrica numa mini-rede. Em específico, pretende-se identificar a capacidade destas FER substituírem a geração proveniente de geradores que usam combustíveis fósseis (diesel) numa mini-rede em Faza (localizada no Quênia). A metodologia, baseada num modelo de otimização, explora a produção de energia eólica e diferentes perfis de produção de energia solar FV, considerando soluções fixas dos painéis solares (tradicionais e bifaciais) com vários ângulos de inclinação e azimute, e ii) soluções com seguimento - um eixo e dois eixos.

DADOS E METODOLOGIA PARA EXPLORAR ESTRATEGICAMENTE AS FER VARIÁVEIS NO TEMPO

Na Figura 1 apresenta-se um diagrama esquemático dos principais passos da metodologia desenvolvida. Como representado na Figura 1, a metodologia proposta neste trabalho aborda apenas os aspetos de integração de energia eólica e solar FV numa mini-rede e os benefícios da exploração da complementaridade da geração FER variável no tempo. Não abrange outros aspetos relevantes, como custos económicos, área disponível para implementação dos sistemas, aspetos sociais de aceitação da integração das FER, tecnologias de armazenamento, etc., que também devem ser analisados em trabalhos futuros.

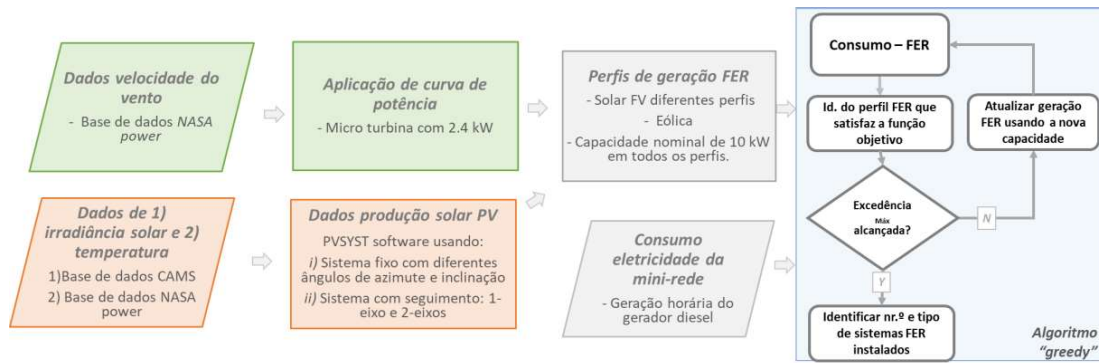


Fig. 1. Representação esquemática da metodologia aplicada no presente trabalho.

Dados

Neste trabalho, os dados referem-se todos a informação horária para o ano de 2022, uma vez que a campanha experimental de recolha de dados de consumo foi realizada para este ano. De seguida apresenta-se uma breve descrição dos três conjuntos de dados usados ao longo do trabalho.

Para gerar os dados de energia eólica, foi utilizada a base de dados NASA power (<https://power.larc.nasa.gov>). Estes dados são derivados do produto de reanálises Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA-2) (Bosilovich, Akella, Coy, *et al.*, 2015). Dadas as especificações técnicas do modelo de aerogerador utilizado (SkyStream de 2.4 kW), os dados foram obtidos para os 20 metros acima do nível do solo. Nesse sentido, foram obtidos os dados de velocidade do vento para os 10 e 50 metros, de forma a determinar o coeficiente de extrapolação vertical para os 20 metros. Posteriormente, aplicou-se a curva de potência do aerogerador selecionado para calcular a potência eólica. Para alcançar um valor próximo de 10 kW, assume-se a instalação de 4 mini-turbinas eólicas em cada iteração. Importa referir que a utilização de uma curva de potência de referência, como a utilizada neste estudo, fornece uma relação quantitativa ideal entre o par velocidade do vento e potência eólica disponibilizado pelo fabricante. Embora a interação entre vários aerogeradores instalados numa distância reduzida entre si e a influência de outros parâmetros meteorológicos possam reduzir o potencial eólico disponível, optou-se por não considerar esses efeitos neste estudo, adotando-se um cenário ideal.

A energia solar FV foi estimada com base i) nas componentes da radiação solar da base de dados CAMS (<https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>) e ii) na temperatura do ar da base de dados NASA power. Os respetivos perfis de geração (Tabela 1) foram calculados através de uma simulação realizada com o *software* PVSYSY, considerando painéis fotovoltaicos de silício monocristalino mono e bifaciais típicos e considerando diferentes ângulos de inclinação e azimute para a fixação dos módulos solares (incluindo sistemas seguidores), visando a obtenção de diferentes perfis de produção elétrica (ex.: maximizando a produção anual, a produção em diferentes estações do ano, etc.). Assumiu-se que uma capacidade total de pico de 10 kW seria instalada em cada iteração.

O consumo de eletricidade, que será necessário satisfazer usando FER variáveis no tempo, corresponde aos valores da geração diesel verificada na mini-rede de Faza no ano de 2022 e que satisfaz o consumo de toda a mini-rede. Estes dados foram recolhidos com resolução de 30 minutos e convertidos em dados com resolução horária.

Algoritmo de otimização “greedy”

Atualmente, existem diversos fatores que afetam e limitam o crescimento da capacidade de energia renovável, entre os quais: preocupações ambientais, segurança energética e objetivos políticos. Em situações multi-objetivo, é importante perceber que se podem otimizar diversas opções. Assim, torna-se relevante decidir antecipadamente que peso (ou importância) atribuir a cada objetivo para criar uma solução viável. O presente trabalho centra-se apenas na forma como a energia eólica e solar podem criar sinergias para satisfazer a procura de eletricidade, através da instalação estratégica de tecnologias de conversão de fontes de energia renováveis com diferentes perfis de geração. Para determinar o portfólio, baseado em FER variáveis no tempo, mais adequado para satisfazer o consumo recorreu-se a um algoritmo de otimização “ganancioso” (do termo inglês *greedy*) (Vince, 2002). Este algoritmo é especialmente útil para problemas de otimização com funções objetivas lineares, devido à sua simplicidade, quando comparado com outros algoritmos de otimização heurística que exigem um esforço computacional superior.

Este algoritmo, conforme descrito em detalhe (Couto e Estanqueiro, 2020), seleciona em cada etapa do processo de otimização, a opção mais favorável, i.e., a opção que permite cumprir com a função objetivo usada. Em específico, a partir dos dados da geração horária do sistema diesel (considerado como o consumo neste trabalho), o algoritmo assume que 10 kW são instalados incrementalmente em cada etapa e seleciona o perfil de geração de energia eólica (*PerfilEolica*) ou solar FV (*PerfilSolar*) que minimiza uma função objetivo predefinida. Neste caso, a função objetivo visa minimizar o uso anual da geração diesel (equação 1). O algoritmo finaliza quando, após identificada a

quantidade otimizada de instalações de cada perfil (eólica - N_{PE} e solar FV - N_{PS}), a geração anual de energia renovável instalada ($FER_{Excedência}$) ultrapassa um limite ($Excedência_{máx.}$) da produção anual da geração diesel (Equação 2). Neste trabalho, foram testados diversos valores deste parâmetro do modelo, variando de 0% a 15%.

$$\min \text{ConsumoDiesel} \quad (1)$$

Sujeita a:

$$100 \cdot \left(\sum_t \frac{FER_{Excedência}(t)}{GeraçãoDiesel(t)} \right) \leq Excedência_{máx.} \forall t \quad (2)$$

com:

$$\text{ConsumoDiesel} = \sum_{t=1}^T GeraçãoDiesel(t) - FER(t) \forall t \quad (3)$$

$$FER(t) = \sum_e \sum_{it} N_{PE}(it, e) \cdot PerfilEolica(t, e) + \sum_s \sum_{it} N_{PS}(it, s) \cdot PerfilSolar(t, s) \forall t, it, e, s \quad (3)$$

$$FER_{Excedência}(t) = \begin{cases} FER(t) - GeraçãoDiesel(t), & \text{if } FER(t) > GeraçãoDiesel(t) \\ 0, & \text{if } FER(t) \leq GeraçãoDiesel(t) \end{cases} \quad \forall t \quad (4)$$

$$FER, GeraçãoDiesel, FER_{Excedência}, N_{PE}, N_{PS} \in \mathbb{NR} \quad (5)$$

Nas equações anteriores os domínios dos índices são: para o tempo $t \in [t_1, t_2, \dots, t_{8760}]$, número de sistemas instalados $it \in [it_1, it_2, \dots, it_{1000}]$ para os perfis de produção eólica $e \in [w_1, w_2, \dots, w_{100}]$ e solar FV $s \in [s_1, s_2, \dots, s_{100}]$, respetivamente.

CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO E PERFIS DE SOLAR FV E EÓLICA

A mini-rede em análise neste trabalho situa-se em Faza, no condado de Lamu (Quênia), com 6 000 utilizadores. Esta mini-rede tem uma capacidade instalada de pico de 0,9 MVA composta por quatro geradores a diesel que satisfazem na íntegra a procura de energia. Na Figura 2 apresenta-se a identificação geográfica da região em estudo e o perfil médio diário da geração diesel.

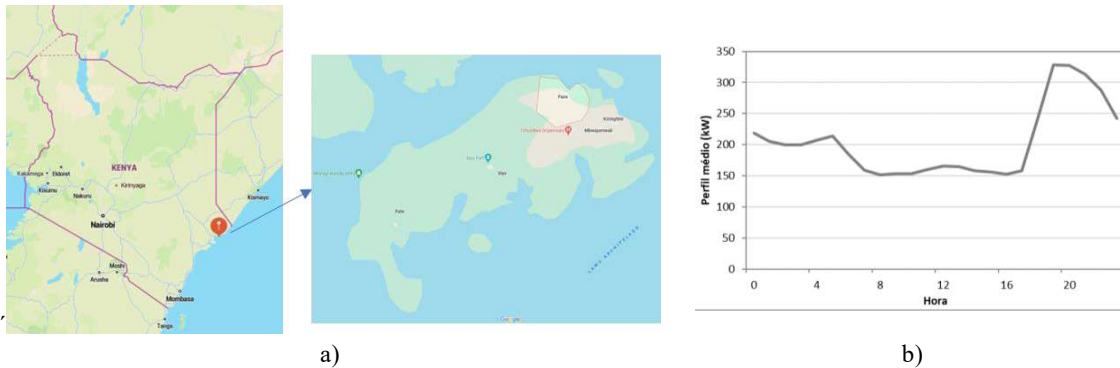


Fig. 2. Caracterização da mini-rede: a) localização e b) perfil médio diário da geração diesel.

Da Figura 2b) é possível verificar que, em média, a geração apresenta os valores mais elevados ao final da tarde (19:00-20:00 h) sendo este incremento associado ao consumo doméstico (e.g., preparação de refeições) e também à necessidade de iluminação. Por outro lado, os valores mais reduzidos de geração encontram-se no período da manhã (8:00 h).

Os perfis de produção solar no caso dos painéis fixos foram obtidos para diferentes ângulos de azimute (A) e inclinação (I) dos painéis. Estes ângulos são apresentados na Tabela 1 para o caso da tecnologia fixa e na Tabela 2 para os sistemas com seguimento. A título de exemplo, na Figura 3, apresentam-se os perfis diários para algumas das opções analisadas neste trabalho. De acordo com a informação das tabelas 1 e 2, 38 perfis de produção foram analisados. Na Figura 3 é possível verificar a diversidade de perfis passíveis de serem aproveitados para suprir o consumo, através da instalação dos sistemas com diferentes ângulos de azimute e inclinação. O valor máximo observado é similar entre as diferentes configurações, embora este varie na hora em que é atingido, sobretudo, de acordo com o ângulo de azimute (orientação) dos painéis. Na maioria dos perfis estudados o máximo observa-se por volta das 12:00 h. No entanto, é possível obter perfis de produção que atingem o seu máximo durante o período da manhã, e.g., $A: -60^\circ; I: 25^\circ$ e $A: -90^\circ; I: 25^\circ$ e outros perfis cujo pico produção, em média, são observados às 14:00 h, e.g., $A: 90^\circ; S: 25^\circ$ e $A: 60^\circ; S: 25^\circ$. A potência média dos sistemas fotovoltaicos fixos corresponde a aproximadamente 20% da capacidade nominal instalada. Como esperado, os perfis baseados em tecnologia com seguimento conseguem capturar mais energia permitindo, em média, obter uma potência média de aproximadamente 27% da capacidade instalada. O sistema de 1-eixo consegue obter um perfil médio de geração similar ao do sistema com 2-eixos.

Contudo, embora estas opções com seguimento possam aumentar a produção de eletricidade em comparação com os sistemas fixos tradicionais, este tipo de sistemas apresenta custos mais elevados de instalação e manutenção e fiabilidade devido à sua configuração mais complexa (Fahad, Islam, Islam, et al., 2019).

Tabela 1. Sistemas solares FV considerados para obtenção de perfis de geração (não seguidores).

Tecnologia Fixa		Tecnologia Fixa com ajuste sazonal		Tecnologia Fixa Bifacial	
Azimute (A)	Inclinação (I)	Azimute (A)	Inclinação (I)	Azimute (A)	Inclinação (I)
0°	5°			0°	5°
30°	5°			30°	5°
60°	5°			60°	5°
90°	5°			90°	5°
-90°	5°			-90°	5°
-60°	5°			-60°	5°
-30°	5°			-30°	5°
0°	0°	0°	25° (Abril. – Setembro.)	0°	90°
0°	25°	30°	0° (Outubro. – Março)	-90	90
30°	25°	60°		0°	0°
60°	25°	90°		0°	25°
90°	25°			30°	25°
-30°	25°			60°	25°
-60°	25°			90°	25°
-90°	25°			60°	25°
				-30°	25°
				-90°	25°

Tabela 2. Sistemas solares FV considerados para obtenção de perfis de geração (seguidores).

Tecnologia com seguimento		
Tipo de seguimento	Azimute (A)	Inclinação (I)
1-eixo (N-S)	0°	-50° to 50°
2-eixos	100° to 100°	0° to 85°

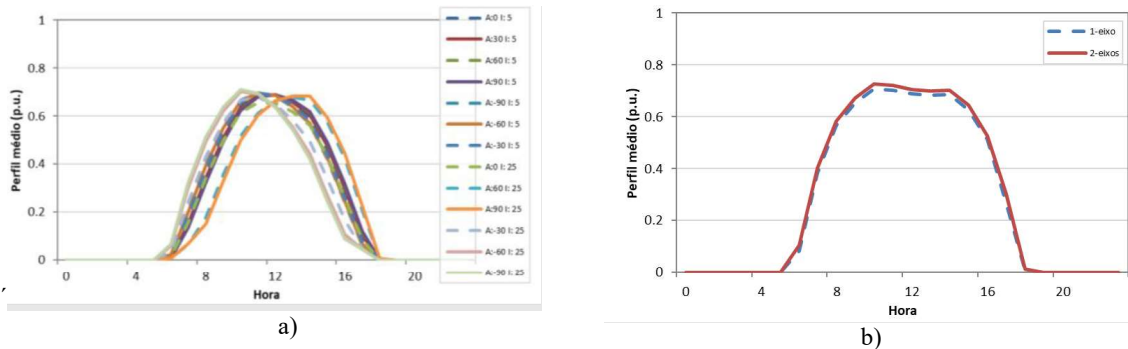


Fig. 3. Perfil médio diário da geração solar FV para: a) alguns ângulos de azimute (A) e inclinação (I) usando tecnologia fixa e b) os sistemas com seguimento de um (N-S) e de dois eixos.

Na figura 4 apresenta-se a curva de potência do aerogerador em análise neste trabalho e o perfil médio diário de produção.

A Figura 4b) denota um perfil típico de regiões costeiras, com o valor máximo, em média, observado durante o período da tarde (16:00h). A potência média corresponde a aproximadamente 25% da capacidade nominal do aerogerador.

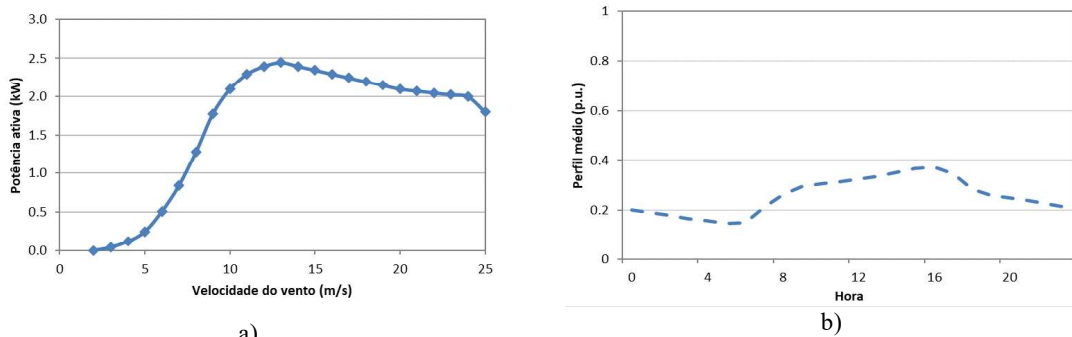


Fig. 4. Curva de potência do aerogerador usada no presente trabalho e perfil médio diário de geração eólica.

PLANEAR A INSTALAÇÃO DA CAPACIDADE EÓLICA E SOLAR FV NA MINI-REDE DE FAZA

Numa primeira fase, verificou-se a capacidade de reduzir a geração usando os geradores diesel no caso onde apenas se instale capacidade solar FV usando a configuração (os ângulos de azimute e inclinação) dos painéis que maximizam a produção anual de energia solar. Esta é a abordagem comum na instalação desta tecnologia e é usada como referência ao longo do trabalho. Na Figura 4 é possível verificar o perfil diário da produção atual com tecnologia convencional subtraída da produção de FER variável no tempo.

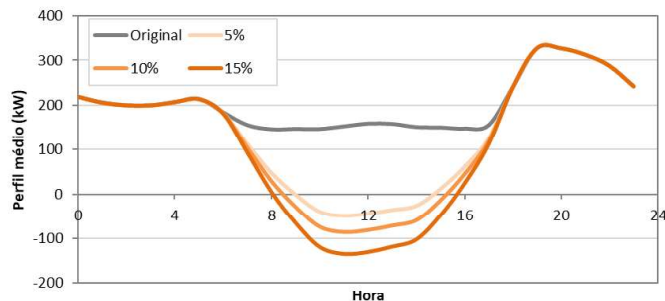


Fig. 4. Perfil médio diário do consumo líquido para diferentes valores de $Excedência_{máx.}$ (5%, 10% e 15%) usando a configuração (orientação e inclinação) dos painéis que garante o valor mais elevado de produção anual desta tecnologia – cenário de referência.

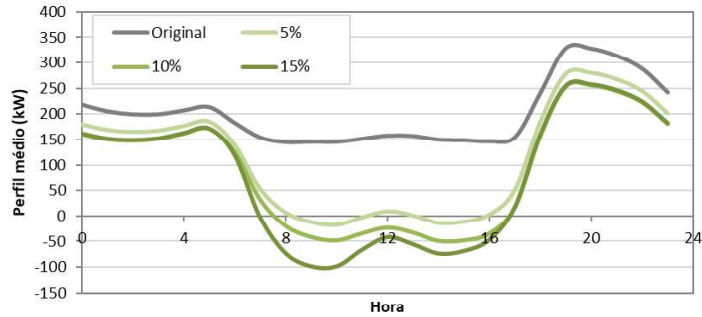
Um valor de excedente de 5% de geração solar FV anual face ao consumo inicial é alcançado com 280 kW de capacidade instalada. Como esperado, a redução na geração com diesel ocorre apenas em horas muito específicas do dia requerendo corte (curtailment) de geração solar. É ainda de realçar a existência de rampas horárias de potência muito significativas. Essas rampas de elevada magnitude podem levar a uma utilização menos eficiente (e mais poluente) dos geradores, sendo igualmente necessário avaliar se os geradores são capazes de responder a essas variações de forma eficaz.

A Figura 5 apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta, *i.e.*, a identificação da capacidade ótima de tecnologia eólica e solar FV para minimizar o uso anual do gerador convencional a diesel.

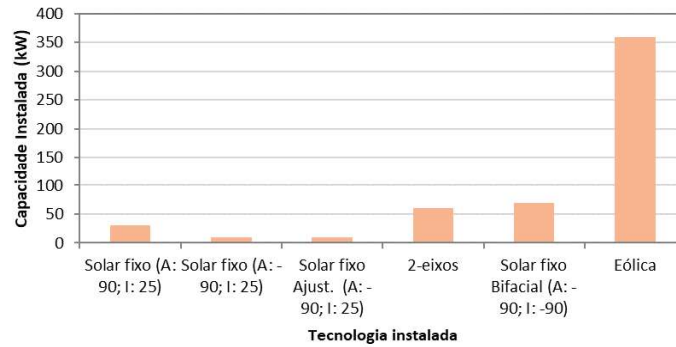
Os resultados da Figura 5 mostram que a energia eólica e solar fotovoltaica pode possibilitar a redução do uso do gerador a diesel, principalmente durante o dia. Para este caso de estudo, em particular, a metodologia destaca a necessidade de uma elevada capacidade de energia eólica, beneficiando da sua capacidade de produção durante o período noturno. Além disso, a instalação de capacidade solar fotovoltaica utilizando diferentes ângulos de azimute e inclinação, bem como sistemas bifaciais, também se mostra essencial para otimizar o perfil de geração ao longo do ano, garantindo uma melhor adaptação às condições específicas do consumo na mini-rede em análise. Assim, os resultados da Figura 5 realçam que uma abordagem estratégica na implantação de energia eólica e solar FV pode apresentar diversos benefícios, com destaque para a redução dos períodos de excedente de energia e nas variações horárias de rampas de potência, podendo contribuir para uma operação mais eficiente da mini-rede.

Na Figura 5b) é possível verificar a capacidade instalada considerando $Excedência_{máx.}$ igual a 15%. Nesta figura é possível verificar a elevada capacidade eólica instalada. Para um valor de $Excedência_{máx.}$ de 5%, a capacidade instalada identificada foi de 370 kW e para um excedente de 10%, a capacidade instalada foi de 470 kW.

A Figura 6 apresenta a redução na geração anual dos geradores a diesel para os dois cenários em análise.



a)



b)

Fig. 5. Perfil médio diário para diferentes valores de $Excedência_{máx}$, usando a metodologia apresentada no presente trabalho - cenário otimizado.

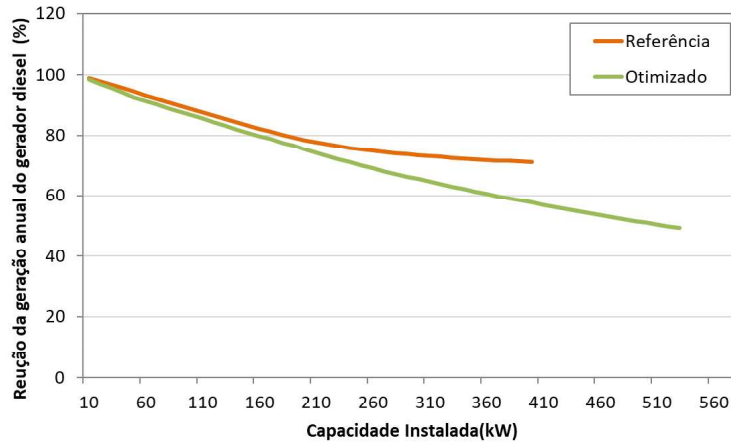


Figura 6. Representação esquemática da metodologia aplicada no presente trabalho.

Como esperado, é possível verificar que a exploração da instalação estratégica das tecnologias eólica e solar FV permite uma redução da necessidade de uso de geradores a diesel. A redução no uso dos geradores a diesel atinge um ponto de saturação após a instalação de aproximadamente 250 kW. Para um excedente de 10%, a redução anual de energia gerada pelo diesel é de: 28% no cenário de referência e 45 % no cenário com instalação otimizada de capacidade. Assim, a redução no uso de geração baseada em diesel é muito mais significativa com a metodologia proposta. No gráfico, destaca-se uma diferença de aproximadamente 13 pontos percentuais para uma capacidade instalada de 400 kW. De realçar que na figura, para a metodologia proposta, a capacidade instalada é superior uma vez que $Excedência_{máx}$, apenas atinge os 15 % para uma capacidade instalada de 530 kW.

NOTAS FINAIS

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para identificar a capacidade mais adequada de energia eólica e solar fotovoltaica para suprimir a procura de energia numa mini-rede no Quênia. Diferentes ângulos de azimute e inclinação dos painéis e soluções com seguimento foram explorados para a tecnologia solar. Os resultados mostram que parte

do consumo de energia pode ser satisfeito com base na energia eólica e solar fotovoltaica, mas são esperados níveis significativos de corte de produção renovável (*curtailment*), mesmo no cenário em que seja utilizada uma abordagem estrategicamente implementada. Para um excedente de 10% na geração eólica e solar em relação ao consumo, observa-se uma redução na energia produzida através dos geradores a diesel de 28% no cenário convencional e de 45% no cenário que emprega a metodologia de otimização proposta neste trabalho. Estes resultados sugerem que mesmo utilizando a solução proposta será necessário explorar soluções de armazenamento, como baterias, para lidar com os períodos de excesso de produção renovável para, posteriormente, fazerem face ao consumo de energia e, assim, alcançar uma descarbonização completa da mini-rede.

É importante ressaltar que esta metodologia concentra-se exclusivamente em explorar as sinergias entre as tecnologias eólica e solar fotovoltaica, sem considerar outros fatores cruciais, como custos, disponibilidade de terrenos, aceitação social e tecnologias de armazenamento, que devem ser investigados em trabalhos futuros.

Os indicadores do presente trabalho reforçam a importância de uma abordagem integrada e estratégica na expansão das energias renováveis, visando não apenas a maximização da geração de energia de fontes renováveis, mas também a minimização dos desperdícios e a garantia de uma operação segura e robusta das mini-redes.

FINANCIAMENTO

This work was funded by the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme through the LEAP-RE project (Grant Agreement no. 963530).

REFERÊNCIAS

- Baskaran, G., e Coste, S. (2024). Achieving Universal Energy Access in Africa amid Global Decarbonization. Em CSIS Briefs (p. 12). Disponível em: https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/2024-01/240131_Baskaran_Energy_Africa.pdf?VersionId=5H6XEI6W.3YisdwUoqotAo7aFeXIHU3 (acedido em 10 Maio de 2024)
- Bosilovich, M., Akella, S., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Gelaro, R., Kovach, R., Liu, Q., Molod, A., Norris, P., Wargan, K., Chao, W., Reichle, R., Takacs, L., Vikhliav, Y., Bloom, S., Collow, A., Firth, S., Labow, G., ... Suarez, M. (2015). MERRA-2 : Initial Evaluation of the Climate. NASA/TM–2015-104606/Vol. 43, NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, September, 139.
- Couto, A., e Estanqueiro, A. (2020). Exploring wind and solar PV generation complementarity to meet electricity demand. *Energies*, 13(6), 32–41. <https://doi.org/10.3390/en13164132>
- ESMAP. (2022). Mini grids for half a billion people - Market outlook and handbook for decision makers. Em Tech. Rep. (p. 322). Disponível em: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00X8SK.pdf (acedido em 10 Maio de 2024)
- Fahad, H. M., Islam, A., Islam, M., Hasan, M. F., Brishty, W. F., e Rahman, M. M. (2019). Comparative Analysis of Dual and Single Axis Solar Tracking System Considering Cloud Cover. 2019 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE), 5. <https://doi.org/10.1109/CEPE.2019.8726646>
- IEA. (2023). Guidebook for Improved Electricity Access Statistics. Em IEA report (p. 57). <https://doi.org/10.1787/c85e7489-en>
- Jayachandran, M., Gatla, R. K., Rao, K. P., Rao, G. S., Mohammed, S., Milyani, A. H., Azhari, A. A., Kalaiarasy, C., e Geetha, S. (2022). Challenges in achieving sustainable development goal 7: Affordable and clean energy in light of nascent technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102692. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102692>
- Mbinkar, E. N., A. Asoh, D., Tchuidjan, R., e Baldeh, A. (2021). Design of a Photovoltaic Mini-Grid System for Rural Electrification in Sub-Saharan Africa. *Energy and Power Engineering*, 13(03), 91–110. <https://doi.org/10.4236/epe.2021.133007>
- Mensah, J. T. (2024). Jobs! Electricity shortages and unemployment in Africa. *Journal of Development Economics*, 167, 103231. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2023.103231>
- USAID e African Union Power Africa. (2021). Unlocking Africa'S Mini-Grid Market Final Report Usaid Scaling Up Renewable Energy Program (Sure). Em Tech. Rep. (p. 76). https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00X8SK.pdf
- Vince, A. (2002). A framework for the greedy algorithm. *Discrete Applied Mathematics*, 121(1–3), 247–260. [https://doi.org/10.1016/S0166-218X\(01\)00362-6](https://doi.org/10.1016/S0166-218X(01)00362-6)
- Zebra, E. I. C., van der Windt, H. J., Nhumaio, G., e Faaij, A. P. C. (2021). A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111036. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111036>