Dimensionamento de Demanda e Armazenamento por Baterias para Microrredes com Energia Renovável em Comunidades Isoladas

Palavras-Chave: Comunidades Isoladas, Emissões de Gases de Efeito Estufa, Microrredes.

Autores/as:

Camila Omae [UNICAMP]

Leonardo Longo Ona Santella [UNICAMP]

Dr. João Inácio Yutaka Ota [UNICAMP]

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva [UNICAMP]

INTRODUÇÃO

O cenário atual do aumento da demanda por energia elétrica é seguido pela crescente preocupação do aumento de emissões de gases que contribuem para o efeito estufa. Neste cenário, questões relacionadas à sua redução, tais como fontes alternativas de energia e o consumo consciente, com enfoque para a eletricidade, são levantadas, uma vez que a produção mundial de energia é majoritária em combustíveis fósseis e altamente centralizada (EUROPEAN COMMISSION, 2006). Em paralelo, surge o conceito de microrrede, a qual pode ser definida como uma rede elétrica local que possui geração a partir de energia renováveis e geograficamente próxima aos consumidores, com o gerenciamento e monitoramento constantes de demanda, geração local e uso de energia da concessionária (EUROPEAN COMMISSION, 2006). As microrredes isoladas, ou seja, sem a conexão direta com uma rede elétrica de uma concessionária de energia, se tornam atrativas em especial para locais e comunidades onde a eletricidade ainda não é entregue devido à necessidade de altos investimentos para a expansão da rede de transmissão e distribuição de energia elétrica. Somam-se a tais questões o incremento da geração solar no Brasil e o crescente interesse em sistemas de armazenamento de energia, reduzindo a necessidade do tradicional uso local de geração a diesel em sistemas isolados (MME, 2021) e fornecendo mais segurança energética para esta possível solução. Neste contexto, existem iniciativas governamentais para o uso de tais tecnologias, porém estudos que apresentem metodologias de dimensionamento e a viabilidade de tais microrredes, tanto financeira quanto ambientalmente, são de extrema importância.

O presente trabalho trata do dimensionamento de microrredes que atendam a demanda de energia de comunidades isoladas através de sistemas de armazenamento de energia por baterias e que sejam alimentadas por geração renovável no local. Mostra-se que o uso de tais tecnologias pode diminuir de maneira expressiva a emissão de gases de efeito estufa oriundo do tradicional uso de geração a diesel, além de evitar o transporte de tal combustível para os locais afastados.

METODOLOGIA

Esta seção apresenta o levantamento de dois aspectos de microrredes isoladas, que são o dimensionamento da demanda energética da área-alvo e o dimensionamento do sistema de armazenamento a ser disponibilizado localmente. Note que não é abordado na pesquisa o dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica, o qual pode ser feito através de softwares apropriados, tais como o Helioscope[1]. Além disso, a análise da redução do impacto ambiental é

[1] https://www.helioscope.com/

apresentada, o qual reforça os benefícios do uso de fontes renováveis de energia em sistemas isolados. Por meio de análises realizadas de resultados de simulações e métodos de otimização matemáticos é possível realizar um estudo sobre o impacto ambiental da implementação de microrredes subsidiadas por painéis solares e sistemas de baterias em comparação com geradores a diesel. Nota-se que a avaliação do impacto ambiental depende da modelagem utilizada. Essa questão é discutida focando em dois softwares distintos, LEAP (HEAPS, 2021) e HOMER Pro (HOMER), cujas metodologias de cálculo dos poluentes gerados pelo gerador a diesel apresentaram resultados próximos para um mesmo perfil de demanda.

Dimensionamento da demanda energética

Necessita-se conhecer a demanda energética das comunidades a serem atendidas para o correto dimensionamento de microrredes isoladas. Na presente pesquisa, o estudo de caso considera (I) serviços de saúde, (II) escolas e (III) a demanda da população local.

Para a determinação da demanda de serviços de saúde, a necessidade energética de comunidades isoladas foi estimada através de dados de ações comunitárias do Projeto Campus Sustentável (DA SILVA, 2018), no qual a demanda de eletricidade por serviços de saúde foi atendida com geração fotovoltaica. Logo, a demanda instalada determinada por meio dos equipamentos existentes no posto foi, em média, de 554,63 kWh anual. Essa estimativa é obtida com as equações 1 e 2 (CELESC), que apresentam, respectivamente, o fator de demanda, FD, e o fator de carga ou consumo, FC, de um posto de saúde.

$$FD = \frac{Demanda\ Máxima}{Demanda\ Instalada} = 30,63\% \quad (1)$$

$$FC = \frac{Demanda\ Média}{Demanda\ Máxima} = 20,63\% \quad (2)$$

Em relação à determinação da demanda de escolas, foram usados dados de outro projeto proposto pelo Escritório Campus Sustentável (DA SILVA, 2018). Com a demanda energética mensal de três escolas na região de Campinas, estado de São Paulo, determinou-se a demanda média mensal per capita, a qual foi de 7,9 kWh/pessoa. Dessa forma, definiu-se a demanda energética anual de uma escola, a qual foi de 7.600 kWh anual.

Por fim, para a determinação da demanda de energia de uso domiciliar e familiar em comunidades isoladas foram analisadas diversas alternativas inicialmente. A abordagem mais comum encontrada em estudos é apontar um perfil genérico de consumo similar a famílias de baixa renda em regiões urbanas, o qual, em muitos casos, não demonstra a real necessidade energética dessas comunidades. Exemplos disso são os programas do governo federal denominados Luz Para Todos (MME, 2015) e Mais Luz Para a Amazônia, nos quais pedem-se projetos que atendam uma demanda determinada em valores fixos de energia e potência. Por conta disso, foi utilizada a alternativa da 'Abordagem Multicamada', em inglês, *Multi-Tiers Framework* (ESMAP, 2015). Tal abordagem define o acesso à energia em escalas de 0 à 5, baseado em diferentes aspectos com o objetivo de observar nuances que vão além do entendimento dos consumidores "conectado" e "não conectado" à rede elétrica. Logo, é possível determinar demandas mais realísticas de uma comunidade isolada a partir dos perfis de consumo de cada camada, baseadas na quantidade de horas de eletricidade disponível e a potência consumida (de acordo com os aparelhos domésticos utilizados), as quais são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de consumo de energia em multicamadas (Adaptado de ESMAP, 2015).

Camada	Horas	W (mínimo)	Wh (mínimo)/dia	kWh/mês	kWh/ano
0	0	0	0	0	0
1	2	6	12	0,36	4,32
2	4	50	200	6	72
3	12	200	1000	30	360
4	18	800	3400	102	1224
5	22,8	2000	8200	246	2952

Avaliando as camadas comparativamente com um estudo de dimensionamento realizado em Lençóis, estado do Maranhão (OLIVEIRA, 2017), observa-se que a camada 2 da tabela 1 se aproxima da

faixa de consumo de famílias de baixa renda no Brasil. Entende-se assim que a metodologia de multicamadas é válida. Por fim, determinou-se a demanda familiar baseando-se na camada 2 da tabela 1 e considerando-se 3 cenários base com 50, 80 e 100 famílias.

Dimensionamento do sistema de armazenamento por baterias

Em relação ao sistema de baterias, este foi dimensionado utilizando uma metodologia que considera a demanda atual do cenário e inclui uma demanda futura, ou seja, um possível aumento da demanda, de forma a assegurar segurança energética. Além disso, a quantidade de dias que seriam adequados para o sistema ter autonomia também foi considerada no dimensionamento do sistema. No caso, foram considerados três cenários base para o dimensionamento do sistema por armazenamento de energia, um com a autonomia de 3 dias, outro de 5 e, por último, um de 7 dias.

Para determinar a quantidade de baterias necessárias, foram utilizadas as equações 3 e 4 (ALVARENGA), sendo que a quantidade é dada pela equação que apresenta o maior valor de capacidade.

$$Capacidade\ [Ah] = \frac{Consumo\ total\ [Wh/dia] \cdot Autonomia\ [dias]}{Tensão\ do\ banco\ de\ baterias\ [V] \cdot Profundidade\ de\ descarga\ no\ final\ da\ autonomia\ [pu]} \quad (3)$$

$$Capacidade\ [Ah] = \frac{Consumo\ total\ [Wh/dia]}{Tensão\ do\ banco\ de\ baterias\ [V] \cdot Profundidade\ de\ descarga\ no\ final\ da\ autonomia\ [pu/dia]} \quad (4)$$

Nota que nas equações 3 e 4 o consumo total é dado pela demanda anteriormente calculada e a autonomia deve ser definida baseado na geração local e a resiliência desejada, o qual foi de 3 a 7 dias nesta pesquisa. Em relação à tensão do banco de baterias, utilizou-se 48 V. A profundidade de descarga no final da autonomia, dada em p.u.[2], foi considerada em 0,6 pu, sendo que descargas mais profundas significam vida útil menor para a bateria, enquanto que descargas menos profundas exigem mais baterias, resultando em um investimento inicial maior. Para a profundidade de descarga no final de cada noite, dada em pu/dia, considerou-se 0,2 pu/dia, visto que valores menores aumentam a vida útil da bateria, sendo o valor considerado determina uma vida útil de 4 anos para a bateria.

Equacionamento da Redução de Emissões

Para o equacionamento da redução de emissões utilizou-se dois softwares de dimensionamento, LEAP (HEAPS, 2021) e HOMER PRO (HOMER). Em uma análise inicial, os resultados de emissões de CO2 devido à geração a diesel para as demandas energéticas estimadas nas comunidades variaram de 78 a 108 toneladas por ano no caso de 100 famílias. Porém, estudando a documentação disponibilizada de cada software e consultando os desenvolvedores, verificou-se que as fórmulas para a estimação de emissões são praticamente idênticas, e que os resultados divergentes eram devido aos dados de entrada de tais fórmulas, tais como o fator de emissão. De maneira sucinta, o LEAP utiliza dados referentes aos relatórios de aquecimento global do IPCC[3], já o HOMER PRO utiliza dados de uma base própria. Utilizando a equação 5, pode-se determinar o fator de emissão de certos gases, tais como o gás carbônico, CO2, e o dióxido de enxofre, SO2.

$$Fator\ de\ emissão\ [kg/kWh] = Emissão\ [kg/L] \cdot Consumo\ de\ combustível\ [L/kWh] \quad (5)$$

Além disso, o cálculo da quantidade de diesel consumida por cada software foi verificado e comparado. No HOMER, tal quantidade era disponibilizada, contudo essa informação não é encontrada no LEAP. Porém, a produção de energia calculada pelo LEAP é de 206.226 kWh e pelo HOMER é de 219.003 kWh para a mesma demanda estipulada de 68.054 kWh por ano para 50 famílias. Considerou-se, então, que os geradores a diesel têm um consumo médio de 0,26 L/kWh (LUMINUS) para estimar a quantidade de diesel com os resultados LEAP. Assim, obteve-se valores próximos de consumo de diesel em ambos os softwares. É importante ressaltar que a geração é maior do que a demanda por conta das perdas do processo de conversão de energia. Com tais considerações foi possível compreender melhor o cálculo das

[2] por unidade.
[3] *Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas é uma organização científico-política criada em 1988 no âmbito das Nações Unidas (ONU) pela iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

emissões e os resultados puderam ser comparados efetivamente. A equação 6 apresenta o cálculo das emissões com base na energia gerada por um certo combustível.

$$Emissão\,[kg/ano] \;=\; Fator\ de\ emissão\,[kg/kWh] \cdot Energia\ gerada\,[kWh/ano] \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das metodologias utilizadas demonstraram ser satisfatórios. Sobre o dimensionamento da demanda energética, a utilização dos *tiers* se mostra uma metodologia mais realista, de modo a permitir uma flexibilidade na avaliação das demandas de energia de comunidades isoladas, as quais podem ser muito baixas ou relativamente altas. Tal metodologia também pode auxiliar no entendimento da expansão da demanda, considerando que consumidores tendem a aumentar a sua demanda uma vez que há disponibilidade de energia em suas regiões.

Em relação ao equacionamento das emissões, foi possível comparar resultados utilizando dois softwares diferentes. Na análise dos algoritmos que são aplicados, constatou-se que o equacionamento utilizado por cada um era similar, apenas com pequenas diferenças na entrada de dados. Para o caso com 50 famílias, foram obtidas as emissões apresentadas pela Tabela 2, sendo que a pequena diferença das emissões é devido às perdas do processo de conversão de energia, a qual gera mudança no total de geração anual.

Tabela 2 - Emissões para uma demanda considerando 50 famílias.

Emissões	HOMER	LEAP
CO2 - Dióxido de carbono	209.079 kg/ano	196.881 kg/ano
CO - Óxido de Carbono	1.422 kg/ano	1.339 kg/ano
UHC (*Unburned hydrocarbons*)	57,6 kg/ano	54,2 kg/ano
Matéria Particulada	5,7 kg/ano	5,4 kg/ano
SO2 - Dióxido de Enxofre	512 kg/ano	482 kg/ano
NOX - Óxidos de Nitrato	114,0 kg/ano	107,4 kg/ano
Geração anual	219.003 kWh	206.226 kWh

Por fim, para o dimensionamento das baterias, utilizou-se uma metodologia simples, porém com prática e própria para sistemas de pequeno porte. Utilizando como base uma bateria LG RESU13[4], de capacidade de 252 Ah (12 kWh) obtemos a quantidade de baterias dadas pela Tabela 3, a qual considerou os três cenários com diferentes autonomias e perdas de 20% no processo de armazenamento.

Tabela 3 - Quantidade de baterias de acordo com a demanda e autonomia.

AUTONOMIA	50 FAMÍLIAS	80 FAMÍLIAS	100 FAMÍLIAS
3 dias	279 baterias	324 baterias	354 baterias
5 dias	465 baterias	540 baterias	590 baterias
7 dias	651 baterias	756 baterias	826 baterias

Ao analisar os resultados da Tabela 3, verificamos um grande número de baterias necessárias para atender tanto a demanda quanto a autonomia do sistema. Porém, é possível estimar o impacto ambiental a partir dos resultados obtidos. Primeiramente, considera-se que a emissão de gases de efeito estufa para a fabricação de 1 kWh de bateria de íon lítio é de 61,9 kg CO2e[5] em uma Avaliação do Ciclo de Vida[6] (CARVALHO, 2021). Para a geração a diesel, tem-se, a partir da Tabela 2, a emissão de cerca de 1,95 kg CO2e para produzir 1 kWh. Para o caso com a menor quantidade de baterias, cerca de 208.900 kg CO2e são emitidos na fabricação, enquanto 618.144 kg CO2e são emitidos para o caso com a maior quantidade. Porém, deixam de ser emitidos 4.271.000 kg CO2e pela geração a diesel considerando 10 anos com a

[4] https://www.solaris-shop.com/blog/lg-chem-resu-battery-the-complete-review/
[5] Dióxido de carbono equivalente (CO2e), usado no cálculo de potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential*).
[6] Avaliação do Ciclo de Vida ou ACV é uma metodologia desenvolvida para mensuração dos possíveis impactos ambientais causados como resultado da fabricação e utilização de determinado produto ou serviço até o seu descarte final.

geração da Tabela 2, dada a vida útil de 10 anos das baterias de íons de lítio. Logo, a substituição do gerador a diesel pela geração renovável de energia e um sistema de baterias contribui com a redução de 85% a 95% da emissão de CO2e considerando apenas a emissão devida à energia produzida pelo diesel por 10 anos, sem contar o processo da produção, transporte, entre outros.

CONCLUSÕES

Considerou-se três diferentes categorias para determinação da demanda baseado no seu uso final: serviços de saúde, escolas e domicílios. Notou-se que a abordagem multicamadas permite uma maior flexibilidade e é menos generalizada na avaliação da demanda domiciliar de consumidores isolados. Embora se tenha notado que a quantidade de baterias necessárias para a montagem de uma microrrede isolada possa ser grande, são claros os ganhos com a redução do uso de diesel, tanto na questão das emissões quanto do transporte do combustível (MME, 2021). Por fim, temos os dados das emissões de poluentes na atmosfera, os quais demonstram que a troca do gerador a diesel por um sistema de geração renovável, tal como painéis fotovoltaicos integrado a um sistema de baterias, se mostra ambientalmente satisfatória, visto uma possível redução da emissão de CO2e em torno de 85% a 95% por kWh produzido pelo gerador a diesel durante 10 anos.

BIBLIOGRAFIA

ALVARENGA, C. A. **Como Dimensionar Um Gerador Fotovoltaico Com Baterias**. Solareng. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/Como-dimensionar-um-gerador-fotovoltaico-com-baterias.pdf>. Acesso em 05 maio 2022.

CARVALHO, L. Maria, TEMPORELLI, Andrea, GIRARDI, Pierpaolo. **Life Cycle Assessment of Stationary Storage Systems within the Italian Electric Network**. Energies, abril 2021.

Celesc Distribuição S.A. (CELESC). **Manual Técnico Orientativo: Eficiência Energética e Gestão da Energia Elétrica na Indústria.**

da SILVA, Luiz C. P., et al. **Sustainable Campus Model at the University of Campinas—Brazil: An Integrated Living Lab for Renewable Generation, Electric Mobility, Energy Efficiency, Monitoring and Energy Demand Management**. In: Towards Green Campus Operations. Springer, Cham, 2018. p. 457-472.

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM (ESMAP), World Bank. **Beyond Connections Energy Access Redefined: Conceptualization Report**. Executive Summary, 2015. Disponível em: <https://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/Topics/Energy%20and%20Extract/Beyond_Connections_Energy_Access_Redefined_Exec_ESMAP_2015.pdf>. Acesso em 05 maio 2022.

EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Research and Innovation. **European Smartgrids Technology Platform: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future**. Publications Office, 2006. ISBN 92-79-01414-5, disponível em https://op.europa.eu/s/vPXk. Acesso em 14/02/2022.

LUMINUS. **"Quanto gera em energia um gerador à diesel"**. Disponível em: <https://www.luminuseletricidade.com.br/quanto-gera-em-energia-um-gerador-a-diesel>. Acesso em 05 maio 2022.

HEAPS, C.G., 2021. LEAP: **The Low Emissions Analysis Platform**. [Software version: 2020.1.30] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. <https://leap.sei.org>. Acesso em: 10/07/2021

HOMER SOFTWARE. <https://www.homerenergy.com>. Acesso em 05 maio de 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Manual Para Atendimento Às Regiões Remotas Dos Sistemas Isolados, 2015.** Programa Nacional De Universalização Do Acesso E Uso Da Energia Elétrica (Luz Para Todos).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2025 - Ciclo 2020**, No. EPE-DEE-DEA-NT-001/2021-r0, 07 de maio de 2021, EPE-MME.

OLIVEIRA, HÉRCULES ARAÚJO. **Rede Híbrida de Distribuição de Energia em CC e CA como uma Solução Alternativa para Microrredes Isoladas**. Pós-graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.