

Integração On-Grid e Off-Grid de Microrredes Utilizando OpenDSS e Python

E. M. Silva, Universidade Federal do Pará, C. E. M. Rodrigues, Universidade Federal do Pará

Abstract--This paper presents an approach to control photovoltaic systems by integrating the Python programming language and the OpenDSS distribution system simulator. Through the development of a customized interface, a versatile and efficient environment was created for analysis, simulation, and control of photovoltaic systems in different operational scenarios. The effectiveness of this control was demonstrated in both grid-connected (On-Grid) and off-grid (Off-Grid) situations, providing optimized management of solar generation and ensuring continuous and reliable energy supply. A case study conducted at the Center of Excellence in Energy Efficiency of the Amazon (CEAMAZON) highlights the applicability and feasibility of these solutions in real-world environments.

Index Terms-- Photovoltaic system, Python, OpenDSS, Off-Grid, On-Grid.

I. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por fontes de energia renovável, os sistemas fotovoltaicos têm se destacado como uma solução promissora para atender às necessidades energéticas de forma sustentável.

A energia elétrica tornou-se fundamental nos tempos atuais, pois oferece comodidades, conforto e impulsiona o progresso econômico. A geração e distribuição desse recurso para atender às crescentes necessidades da sociedade resultou em uma ampliação na escala e na complexidade dos sistemas elétricos de potência. A demanda energética da sociedade contemporânea também exige que esses sistemas forneçam energia confiável, de qualidade e resiliente a falhas [1]. Especialmente em cenários diversos, como redes conectadas à rede elétrica principal (On-Grid) e sistemas isolados (Off-Grid).

Este artigo propõe uma abordagem mais prática para o controle de sistemas fotovoltaicos, utilizando Python como linguagem de programação e o Open Distribution System Simulator (OpenDSS) como base para simulação e análise. A interface COM do OpenDSS torna o software adaptável a uma série de problemas, ampliando a sua aplicação. Ela permite que o usuário crie loops e algoritmos específicos em diversas linguagens de programação, como: Matlab®, Python, VBA e outros [2]. Ao integrar essas tecnologias, foi possível desenvolver um sistema de integração de monitores mais

flexível, capaz de gerenciar eficientemente os dois cenários de funcionamento de sistemas fotovoltaicos.

O OpenDSS oferece uma plataforma poderosa para modelagem e simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica, permitindo a análise detalhada de componentes e o estudo de diferentes condições operacionais. Com a modernização das redes elétricas e a inclusão de dispositivos modernos, a complexidade para a realização das análises e simulações dos sistemas elétricos tornaram-se mais trabalhosas e complexas. Este fato motivou o desenvolvimento de ferramentas computacionais, a fim de buscar uma maior agilidade no desempenho dos cálculos, a exemplo, têm-se a ferramenta Distribution System Simulator (DSS), comprada pela Electric Power Research Institute (EPRI) em 2004, adotando o critério de código aberto, OpenDSS, a fim de possibilitar contribuições para o contexto das smart grids [3].

Ao combiná-lo com a flexibilidade e facilidade de programação do Python, possibilitando criar um ambiente de desenvolvimento versátil para a implementação de estratégias de controle avançadas.

Este artigo explora como essa integração entre Python e OpenDSS pode ser utilizada para desenvolver um sistema de integração eficaz para sistemas fotovoltaicos, abrangendo tanto a operação conectada à rede quanto a operação isolada. Serão apresentadas técnicas de controle e algoritmos específicos para cada cenário.

Em suma, este trabalho objetiva uma apresentação de um algoritmo para a análise significativa de sistemas fotovoltaicos, fornecendo uma abordagem mais prática para o controle e otimização de seu desempenho, tendo como material de estudo, o sistema híbrido do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON).

II. A REDE DE DISTRIBUIÇÃO E O SISTEMA HÍBRIDO

A rede de distribuição utilizada neste trabalho foi a da Cidade Universitária José da Silveira Netto, Campus Guamá da UFPA. Essa rede foi modelada e proposta em [4], utilizando o software Open Distribution System Simulator (OpenDSS), o sistema híbrido analisado neste estudo, que inclui três microgerações de energia solar fotovoltaica, um gerador a diesel e um sistema de armazenamento de baterias, utilizando baterias de íon de lítio,

Este trabalho foi apoiado pela UFPA através do Programa De Apoio ao Doutor Pesquisador (PRODOUTOR).

E. M. Silva pertence ao Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Pará (e-mail: elder.mendes.silva@itec.ufpa.br).

C. E. M. Rodrigues é filiado ao CEAMAZON, UFPA, Belém, PA (e-mail: carloseduardo.pa@hotmail.com).

que também, é conectado à rede elétrica pública, localizado no CEAMAZON na UFPA, na cidade de Belém, Pará, Brasil.

A Universidade possui um software de gerenciamento de energia em tempo real, Sistema de Gerenciamento de Energia Elétrica (SISGEE), que permitiu o levantamento das curvas de cargas dos secundários dos transformadores de distribuição. De acordo com [5], o sistema está consolidado e conta com 27 medidores de energia elétrica em funcionamento ao longo de sua rede de distribuição. O software SISGEE disponibiliza a opção de download das curvas de cargas por fase, sendo assim, realizou-se o download das curvas diárias de potência ativa e reativa de cada fase dos transformadores envolvidos no alimentador em estudo. Por se tratar de um sistema de distribuição, onde há presença de cargas monofásicas e bifásicas, trata-se de um sistema desequilibrado, onde há um desbalanceamento entre as fases, ou seja, a injeção de potência é diferente nas três fases. Os dados foram baixados na extensão .CSV e tratados, para, então, utilizá-los no OpenDSS. Estas informações serviram para modelar as loadshapes utilizadas nas cargas do alimentador.

A geração de energia renovável fotovoltaica é composta por três sistemas fotovoltaicos totalizando 80 kWp conforme apresentado na imagem a seguir:

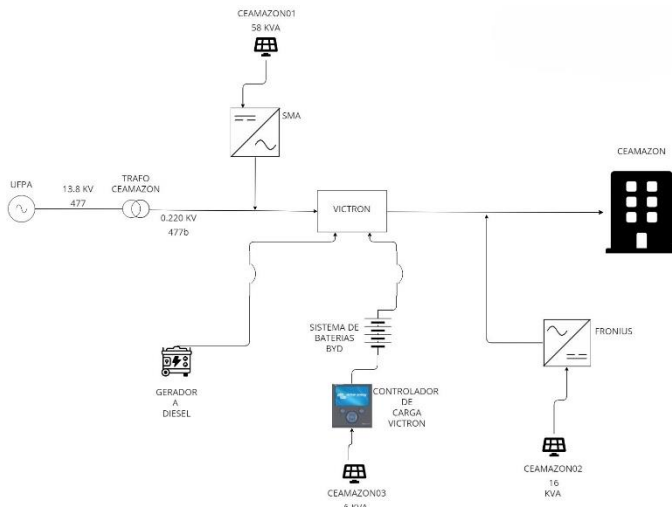


Fig. 1 – Sistema híbrido do CEAMAZON modelado no OpenDSS

A. Sistema de Gerenciamento



Fig. 2 – Container do sistema BESS

Para gerenciar as fontes de geração, a operação do sistema de armazenamento, bem como dispositivos de proteção e cargas, um controlador de sistema centralizado composto por seis inversores/controladores de carga com uma potência total de 60 kW foi utilizado. O sistema de gerenciamento permite a configuração remota de parâmetros, bem como monitoramento em tempo real diretamente da página web do sistema. Esta forma de geração ficou conhecida como Micro (geração inferior à 75 kW) distribuída de energia elétrica [6].

B. Sistema Fotovoltaico

- PV-CEAMAZON 01 (58 kWp): Representa o sistema fotovoltaico clássico conectado à rede elétrica, ou seja, para sua operação, é necessário que a rede de distribuição da universidade esteja operando normalmente; caso contrário, o sistema será desconectado automaticamente. Este sistema possui um inversor de 50 kW.
- PV-CEAMAZON 02 (16 kWp): Está conectado à mini-rede elétrica do CEAMAZON. Portanto, em caso de falha na rede elétrica, este sistema de geração irá operar normalmente para fornecer energia à mini-rede no modo Off-Grid, atendendo às cargas dos edifícios. Este sistema possui um inversor de 15 kW.
- PV-CEAMAZON 03 (6 kWp): Este sistema será exclusivamente para fornecer energia ao sistema de armazenamento, de modo que toda a sua geração atenderá à demanda da bateria para energia armazenada, que por sua vez servirá como backup para o sistema híbrido. Este sistema está conectado ao barramento de corrente contínua (CC) por meio de um controlador de carga.

C. Gerador a Diesel

Foi utilizado neste estudo um gerador a diesel existente, com uma potência nominal de 50 kW no modo de espera e 45 kW no modo principal.

D. Sistema de Armazenamento

O sistema de armazenamento consiste em um conjunto de oito baterias de fosfato de ferro e lítio (LiFePO₄) com uma energia utilizável de 13,8 kWh cada, totalizando 110,4 kWh, e uma capacidade individual de 270 Ah, totalizando uma capacidade de 2160 Ah. Para o modo de carregamento, foi definida uma taxa de 0,035 C, com 75 A. As baterias estão equipadas com um sistema de gerenciamento de bateria (BMS) e uma unidade de gerenciamento de bateria (BMU) que permitem a operação correta e a comunicação com inversores/carregadores externos para uma operação segura e confiável que prolonga sua vida útil.

III. METODOLOGIA

A forma de realizar a codificação é através de scripts de comando, local onde o usuário pode utilizar os programas adequados à cada circuito a ser simulado [7]. Dessa forma, abrindo inúmeras possibilidades para vários softwares de conexão, nesse caso será o Python.

Apesar das inúmeras vantagens, o OpenDSS apresenta algumas limitações, dentre elas: ausência de uma interface gráfica, necessidade de alto conhecimento técnico por parte do analista, além de conhecimento da sintaxe de cada linha de comando [8].

A implementação da interface de controle do OpenDSS envolveu uma série de etapas, cada uma delas exigindo uma compreensão profunda das tecnologias envolvidas. A escolha das bibliotecas certas desempenhou um papel crucial no desenvolvimento de uma solução robusta e eficiente para atender às necessidades do trabalho.

Tkinter, Opendsdirect e Matplotlib são bibliotecas fundamentais no desenvolvimento de aplicativos Python para controle e análise de dados do OpenDSS. Tkinter facilita a criação de interfaces gráficas intuitivas e responsivas, permitindo customizações detalhadas com botões, menus suspensos e rótulos. Opendsdirect integra a comunicação entre Python e OpenDSS, possibilitando o carregamento de arquivos .dss, a interação direta com os dados da rede elétrica, e a manipulação de cenários On-Grid e Off-Grid. Matplotlib, por sua vez, é essencial para a geração de gráficos detalhados e visualmente atraentes, aprimorando a visualização e análise dos dados dos monitores de energia.

A. Interface

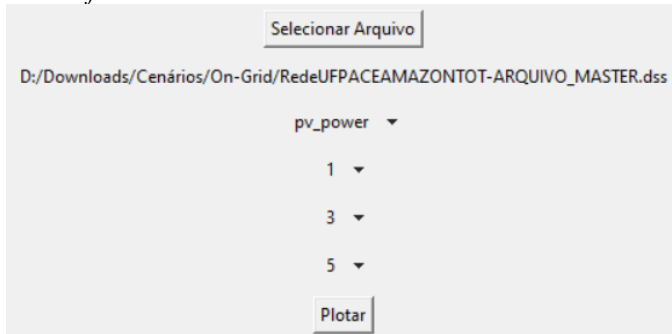


Fig. 3 - Interface de Funcionamento

Com as bibliotecas citadas anteriormente, foi possível desenvolver essa interface que é capaz de selecionar o arquivo .dss e poder acessar diretamente os seus monitores de forma que o próprio usuário possa selecionar os canais necessários. Entretanto, a interface se limita a 3 canais com o intuito de dar ênfase nas 3 fases do sistema. Dessa forma, sendo possível gerar alguns gráficos com mais facilidade do que no próprio OpenDSS.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Operação On-Grid

Um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, ou sistema fotovoltaico On-Grid, é um sistema de energia solar que produz eletricidade e está interligado à rede elétrica. Esse tipo de sistema inclui painéis solares, um ou vários inversores, um dispositivo de condicionamento de energia e um equipamento de conexão à rede [9]. Eles variam desde pequenos sistemas residenciais e comerciais até grandes usinas solares em larga escala. Neste cenário, há a presença de três inversores e, ao contrário da maioria, conta com um conjunto de baterias e um gerador a diesel. Sem contar o benefício de gerar créditos que o sistema híbrido permite.

O controle de um sistema fotovoltaico On-Grid é capaz de garantir que a geração de energia seja otimizada para maximizar a utilização da energia solar disponível e minimizar a dependência da rede elétrica principal. Isso pode envolver a

implementação de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) para garantir a eficiência máxima da geração solar, bem como estratégias de controle de potência para coordenar a interação do sistema com a rede elétrica. Baseado nisso, o algoritmo utilizado foi feito especificamente para controlar os componentes do sistema de modo que ele utilize ao máximo, todo o seu potencial com o intuito de suprir o prédio do CEAMAZON.

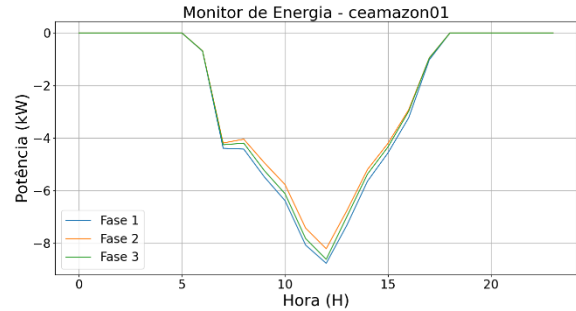


Fig. 4 – Potência injetada no Victron; CEAMAZON01

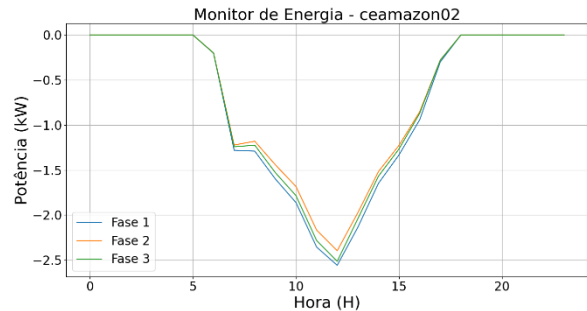


Fig. 5 – Potência injetada no Victron; CEAMAZON02

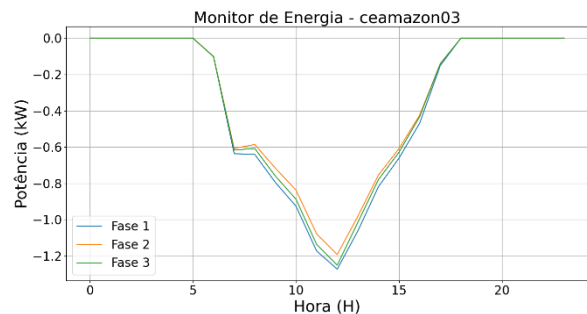


Fig. 6 – Potência injetada no Victron; CEAMAZON03

As Fig. 4, 5 e 6 resultam na Fig. 7, que representa o total dos três sistemas juntos, visto que o OpenDSS gera resultados conjuntamente na saída do transformador.

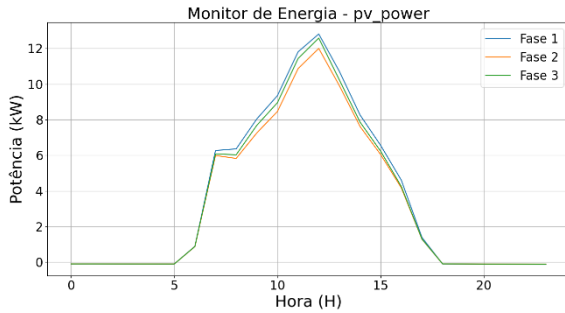


Fig. 7 – Potência total do sistema fotovoltaico sem influência das baterias

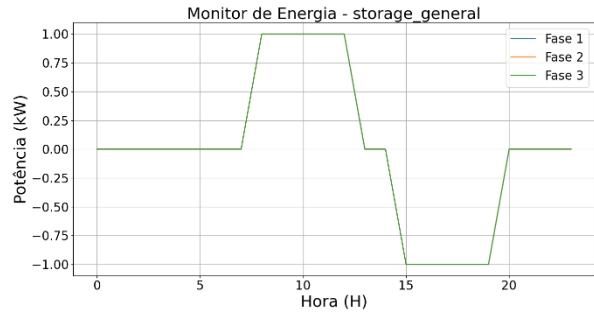


Fig. 10 – Curva de operação do sistema de armazenamento.

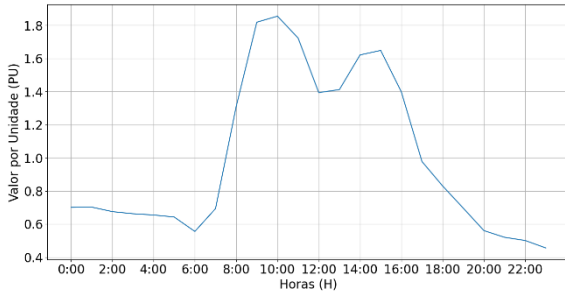


Fig. 8 – Curva de demanda do prédio do CEAMAZON em um dia da semana

Fazendo um paralelo entre a Fig. 7, geração fotovoltaica e a Fig. 8, demanda de carga, é visível que a geração entra em decaimento após o seu pico, juntamente com a carga que há uma diminuição a partir das 15:00, e há uma redução considerável a partir das 17:00, dessa forma é necessário implementar o sistema de armazenamento para complementar de modo que diminua o uso da rede ao máximo.

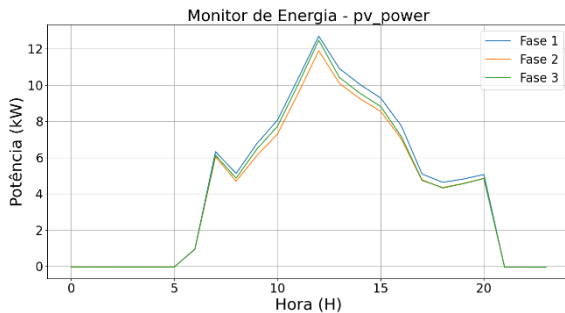


Fig. 9 – Potência total do sistema fotovoltaico juntamente com o sistema de armazenamento

Ao comparar a Fig. 7 com a Fig. 9, é possível perceber que o funcionamento das baterias foi ajustado para suportasse tanto o decaimento da geração fotovoltaica, como o pico de carga do prédio. Dessa forma, fazendo com que o sistema de armazenamento reduzisse o suporte da rede ao máximo.

Dessa forma, as baterias carregam no horário das 8:00 até 14:00 no sistema fotovoltaico, a partir das 15:00 o descarregamento se inicia para complementar a carga até às 21:00 onde há uso significativo de carga, após esse período, apenas a rede externa funciona.

B. Operação Off-Grid

Esses sistemas Off-Grid ou autônomos de geração atual não necessitam ser conectados a uma rede elétrica principal para gerar energia solar, daí o termo “isolado”. Eles frequentemente estão situados em regiões onde o acesso à eletricidade é limitado.

Nestes casos, não há dependência da rede externa, mesmo com acesso disponível. A montagem é simples e prática e proporciona a capacidade de utilizar energia enquanto reduz o consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis [10].

No entanto, nesse caso haverá o uso do gerador a diesel para poder substituir a rede externa, visto que na On-Grid não foi necessário o uso do gerador.

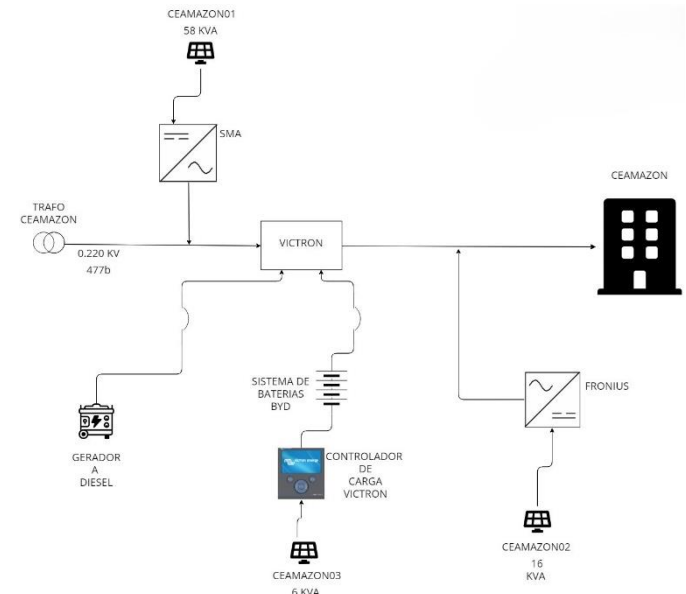


Fig. 11 – Sistema híbrido modelado no OpenDSS para o cenário Off-Grid

No cenário Off-Grid, o sistema híbrido do CEAMAZON opera de forma independente como mostrado na Fig. 11, sem estar conectado à rede elétrica principal. Nesse cenário, os componentes do BESS juntamente com o gerador ficam disponíveis para suprir as demandas de carga do sistema. No entanto, o controle do sistema fotovoltaico Off-Grid foi delicado, pois foi necessária a gestão eficiente da energia

armazenada para garantir o fornecimento contínuo de energia, mesmo em condições de baixa geração solar ou alta demanda de carga. Dessa forma, foi usado o mesmo algoritmo de controle e interface para gerar esse cenário.

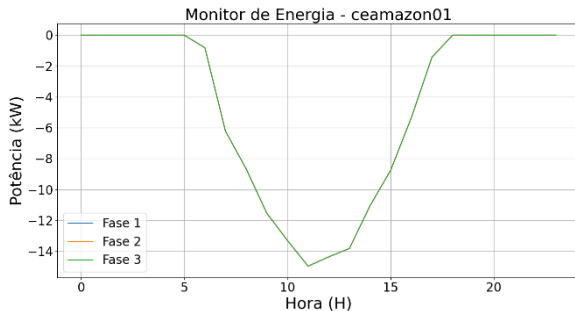


Fig. 12 - Potência injetada no Victron; CEAMAZON01

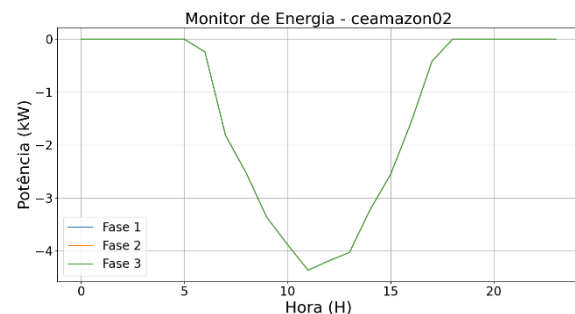


Fig. 13 - Potência injetada no Victron; CEAMAZON02

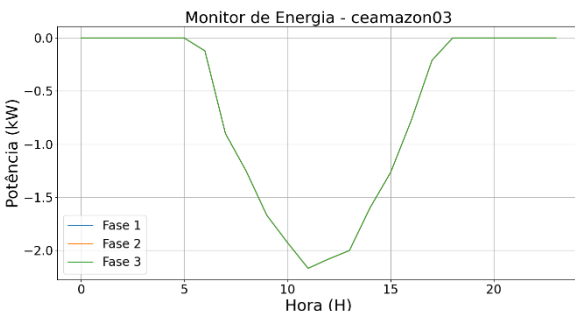


Fig. 14 - Potência injetada no Victron; CEAMAZON03

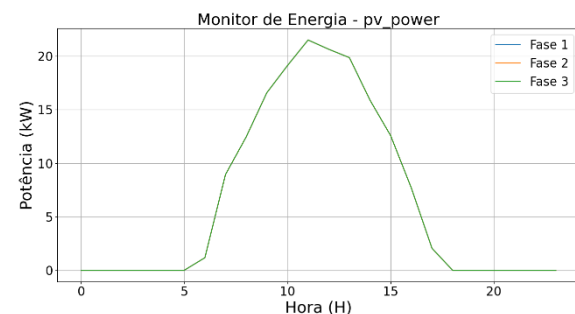


Fig. 15 - Potência total do sistema fotovoltaico sem influência das baterias e do gerador

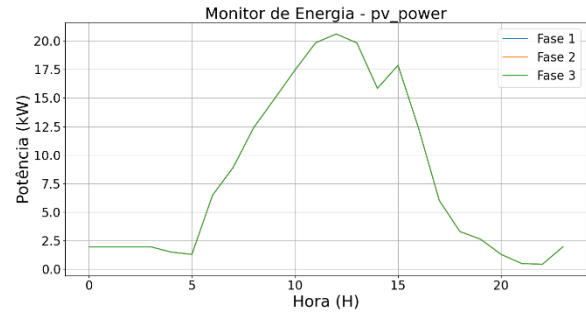


Fig. 16 - Potência total do sistema fotovoltaico com influência das baterias e do gerador

Nessa simulação, já foi implementado o gerador a diesel juntamente com os componentes do BESS, pois ao contrário do primeiro caso, existe a necessidade de suprir as cargas de iluminação no prédio q eram supridas pela rede externa. Continuamente, é possível perceber uma diferença entre a figura 15 e 16 devido ao funcionamento das baterias e do gerador que terá sua curva de funcionamento apresentada a seguir

Diferentemente do primeiro cenário de operação, as fases se sobrepõem pela ausência da carga conectada da rede, funcionando de modo isolado, até gerando mais energia do que no primeiro.

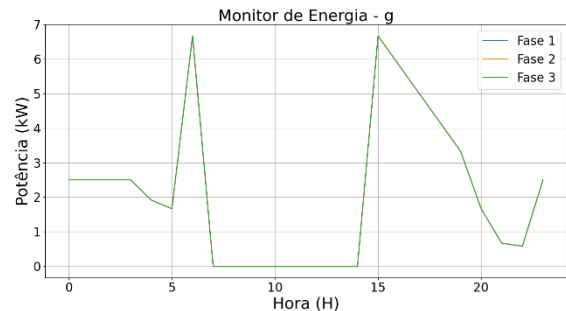


Fig. 17 - Curva de operação do gerador a diesel

Variadamente do cenário On-Grid, não houve acesso a rede externa, tornando crucial o uso do gerador a diesel na garantia do fornecimento contínuo de energia para o prédio do CEAMAZON. Entretanto, é perceptível que o funcionamento do mesmo não possui semelhança ao funcionamento do sistema de armazenamento que respeita a mesma operação do cenário On-Grid, devido aos diferentes papéis dados aos componentes.

V. CONCLUSÃO

O artigo discute uma abordagem inovadora para o controle de integração de sistemas fotovoltaico, utilizando a linguagem de programação Python com o simulador de sistemas de distribuição OpenDSS. Através dessa integração, foi criada uma interface personalizada que permite a análise, simulação e controle eficientes de sistemas fotovoltaicos, tanto em cenários conectados à rede (On-Grid) quanto em cenários isolados (Off-Grid).

A pesquisa foi aplicada no sistema híbrido do CEAMAZON, demonstrando a viabilidade e a eficácia da metodologia proposta. Os resultados mostraram que a integração entre

Python e OpenDSS oferece uma solução robusta para otimizar o gerenciamento de energia solar, maximizando a utilização da energia disponível e minimizando a dependência da rede elétrica, mesmo em condições adversas.

Essa abordagem destaca-se pela flexibilidade e pela capacidade de adaptação a diferentes condições operacionais, contribuindo significativamente para o avanço tecnológico em energias renováveis e para a melhoria da eficiência energética em sistemas complexos modelados em OpenDSS.



Carlos Eduardo Moreira Rodrigues nasceu em Xinguara, Brasil, em 26 de abril de 1993. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2016), mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (PPGEE-UFPA) (2018), e doutorado pela Universidade Federal do Pará (PPGEE-UFPA) (2021), na área de sistemas de energia e redes de distribuição. Atualmente é engenheiro da Universidade Federal do Pará, com atuação em linhas de pesquisa nas áreas de mercado de energia elétrica, redes de distribuição e microrredes.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] HEBLING, Gustavo Miranda. Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição malhadas. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/3ba5154b-b7f0-493f-8a1f-9981ccb9f5d7/Hebling_Gustavo_tcc.pdf. Acesso em: 11 jul. 2024..
- [2] SEXAUER, J. Introdução ao OpenDSS. [S.l.], 2016. 35 p. Electric Power Research Institute
- [3] RADATZ, P. R. R. F. Modelos avançados de análises de redes elétricas inteligentes utilizando o software OpenDSS. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.
- [4] V. B. Andrade, U. C. Paixão Jr., C. E. Moreira, T. M. Soares, J. M. Tabora, M. E. Tostes, U. H. Bezerra, B. S. Albuquerque e L. S. Gouveia, "Modelagem de um sistema de distribuição real desbalanceado e análise do impacto da geração distribuída utilizando o software OpenDSS," apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, Brasil, 2020.
- [5] Carvalho, I.S., Tostes, M., Paixão, U., Monteiro, F., Muniz, J., "Sistema de Gestão de Energia e Validação de seus dados", Conferência Brasileira Sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE), 2019
- [6] ANEEL. Geração Distribuída. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracaodistribuida>. Acesso em: 10 julho de 2024a.
- [7] DUGAN, R. C. The Open Distribution System Simulator OpenDSS. Disponível em: <ftp://197.155.77.3/sourceforge/e/el/electricdss/OpenDSS/OpenDSSManual.pdf>
- [8] FREITAS, Paulo R. R. Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando software OpenDSS. 189f. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.
- [9] AUDIBERT, Pierre; ROUARD, Danielle. A energia solar. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1979.
- [10] BENEDEUCE, Fábio Cezar Aidar. Energia solar fotovoltaica sem mistérios. Fortaleza: Banco do Nordeste, 1999.

VII. BIOGRAFIAS



Elder Mendes Silva nasceu em Belém-PA-Brasil em 2002. É estudante de graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará(UFPA) desde 2002. Atualmente é bolsista de iniciação científica pela UFPA desenvolvendo pesquisas nas áreas de geração distribuída e qualidade de energia.