

Modelagem de Minirrede com Sistema Fotovoltaico, Diesel e Armazenamento de Energia Utilizando OpenDSS e Python

Gabriel A. Couto^{*}, Bruno S. Albuquerque, Welton Santos
Carmina M. Carvalho^{**}, Maria E. Tostes^{***}, Andréia Nascimento

^{*} CEAMAZON, UFPA, PA, (e-mail: gabriel.couto@itec.ufpa.br)

^{**} CEAMAZON, UFPA, PA, (e-mail: carmina@ufpa.br)

^{***} CEAMAZON, UFPA, PA, (e-mail: tostes@ufpa.br)

Abstract: This work presents the modeling and simulation of a hybrid mini grid with photovoltaic-diesel generation and an energy storage system. The studied network refers to the facilities of the Center of Excellence in Energy Efficiency of the Amazon (CEAMAZON), located at the Federal University of Pará (UFPA), enhanced by the project of an Intelligent System for the Efficient Management of Multimodal Electric Mobility. The model was created with OpenDSS software associated with Python, ensuring that the environment formed represents the electrical characteristics and operational resources of the grid. The study compared the data from the simulations with measurements from the real grid, verifying the parity between them.

Resumo: Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de uma minirrede híbrida com geração fotovoltaica-diesel na presença de um sistema de armazenamento de energia. A rede estudada se refere às instalações do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA), incrementada pelo projeto de Sistema Inteligente de Gestão Eficiente de Mobilidade Elétrica Multimodal. O modelo foi criado com o *software* OpenDSS associado com Python, garantindo que o ambiente formado represente as características elétricas e os recursos operacionais da rede. O estudo comparou os dados das simulações com medições da rede real, verificando a paridade entre elas.

Keywords: Modeling; Mini grid; Distributed Generation, Energy storage system; OpenDSS

Palavras-chaves: Modelagem; Minirrede híbrida; Geração Distribuída; Sistemas Fotovoltaicos; Sistema de Armazenamento de energia; OpenDSS.

1. INTRODUÇÃO

A geração distribuída (GD) vem crescendo exponencialmente no mundo globalizado. No Brasil, a energia gerada de forma distribuída se multiplicou em 50 vezes de 2016 até 2020, passando de 104 GWh para 5.269 GWh, respectivamente (EPE, 2021).

Diferente da geração centralizada (GC) que possui instalações com altíssima potência e conectada a rede de transmissão de energia, a GD é caracterizada pela conexão diretamente na rede de distribuição ou na unidade consumidora (UC) com baixa ou média potência instalada, não passando de alguns MWs. Os principais objetivos da instalação de geradores distribuídos está atrelado a diversificação da matriz energética, com aproveitamento maior de recursos renováveis, além de beneficiar o consumidor, podendo este gerar sua própria energia e/ou injetar na rede gerando créditos futuros.

Esse crescimento sem precedentes pode causar impactos na rede. A medida que o nível de penetração de GD em um alimentador de distribuição cresce, mais visíveis são

os impactos da GD no sistema, geralmente através de zonas de sobretensão ou de fluxos reversos de potência. Neste cenário, visando proteger os sistemas de energia elétrica (SEE), que até o momento eram adaptados a GC, as legislações vem sendo constantemente atualizadas, estabelecendo um ambiente justo para os consumidores e para os agentes dos SEEs (Razavi et al., 2019).

Para realizar estudos das complexas redes que possuem GD, o *software* Open Distribution System Simulation (OpenDSS) tem sido bastante utilizado no ramo acadêmico. O OpenDSS é capaz de simular redes elétricas com as principais fontes utilizadas em instalações com GD, sendo flexível o suficiente para representar a maioria dos cenários encontrados atualmente (Tavares, 2018).

Visando buscar soluções para estes problemas, diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) vem sendo realizados. Neste cenário, o Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) e a Universidade Federal do Pará (UFPA), por meio de parceria com a Norte Energia, participa do Sistema Inteligente de Gestão Eficiente de Mobilidade Elétrica Multimodal, PD-07427-0319/2019, sendo parte do projeto a implementação de uma minirrede (MR) contendo um sistema fotovoltaico-diesel com sistema de armazenamento, além da compra e

^{*} Estudo apoiado financeiramente pela PROAD-UFPA e pelo projeto de Mobilidade Elétrica, PD-07427-0319/2019.

a infraestruturação do campus universitário para o funcionamento de um ônibus e um barco elétrico (NESA, 2019).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo identificar e modelar as características elétricas e operacionais disponíveis em uma minirrede com geração fotovoltaica-diesel-sistema de armazenamento em um ambiente flexível e escalável, podendo ser simulada em diferentes ambientes e condições climáticas, analisando os principais parâmetros da minirrede e verificando o comportamento dela a diferentes cenários. A paridade entre a minirrede simulada e a real será verificada a partir dos resultados das simulações e das medições do sistema real.

2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De acordo com Ackermann et al. (2001), em sua busca pela definição de GD, concluiu-se que: GD é caracterizada pela instalação de uma fonte de energia elétrica conectada diretamente a rede de distribuição ou na unidade consumidora.

Nesse aspecto, viu-se o crescimento do mercado de GD disparar após a ANEEL publicar a Resolução Normativa N°482 de 2012 e suas revisões, N°687 de 2015 e N°786 de 2017, onde é prevista a interligação de cogeneradores qualificados e de energias renováveis à rede de distribuição. Aliada a incentivos fiscais e em busca de vantagens monetárias, tais regulações causaram um grande impacto positivo no mercado de GD, sendo mais significativo para os sistemas fotovoltaicos (SFV), que detêm mais de 90% do mercado de GD (EPE, 2021). Porém, as resoluções vigentes não preveem o conceito de GD com sistema de armazenamento (SA) conectada à rede, limitando a operabilidade de sistemas do gênero.

A GD é predominantemente composta por fontes de energia renováveis, tais fontes possuem geração de energia intermitente, concentrada em certos períodos e com baixa precisão quanto a previsão de geração.

Tais fatores podem beneficiar ou prejudicar a rede. Como benefícios, pode ser citado que ao trazer a geração mais próxima do consumidor, ocorrerá uma diminuição das perdas técnicas geradas pelo transporte de corrente, gerando também uma diminuição no carregamento de equipamentos de distribuição, podendo adiar investimentos na expansão do sistema. (V.B. Andrade et al., 2020) (ANEEL, 2015).

A seguir, serão apresentados os conceitos básicos e as principais características das fontes de energia mais utilizadas na concepção de minirrede híbrida na presença de um SA.

2.1 Fontes de Energia na Geração Distribuída

Esta seção apresentará as fontes de geração distribuída utilizadas no presente trabalho, dando ênfase aos SFVs e SA.

2.1.1. Sistemas Fotovoltaico

Sendo a fonte de geração de energia mais utilizada nas GDs, o SFV converte a energia da irradiação solar em energia elétrica. Tal característica é possível devido ao

efeito fotovoltaico que ocorre em suas células fotovoltaicas. Estas células são conectadas entre si formando um módulo fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos são associados em *Strings* que se conectam a um controlador de carga ou a um inversor fotovoltaico. Um controlador de carga é utilizado para sistemas que possuem barramento de corrente contínua (CC) e precisam respeitar certo nível de tensão, geralmente situado em múltiplos de 12 V. A maioria das aplicações que possuem um barramento CC são associadas com outros dispositivos que funcionam em CC, como um SA.

Um inversor fotovoltaico é utilizado quando se deseja converter a energia em CC para corrente alternada (CA). Esta etapa ocorre para sistemas com ou sem barramento CC, visto que ela pode ser realizada com a energia recebida diretamente dos módulos fotovoltaicos. A conversão da energia de CC para CA é importante tanto para a alimentação de cargas CA quanto para a injeção desta energia na rede de distribuição, esta segunda ocorrendo quando o balanço energético entre consumo e geração é positivo.

A geração de um SFV, por sua própria característica, é altamente dependente das condições meteorológicas do local de sua instalação, sendo as mais impactantes: a temperatura e irradiação nas células fotovoltaicas.

De acordo com A.R. Amelia et al. (2016), a relação entre a eficiência de geração e a temperatura de célula é negativa, tendo como fator médio para painéis monocristalinos o valor de $-0.446\%/^{\circ}\text{C}$. Por outro lado, o trabalho revela que, a partir de certo patamar, a relação entre a eficiência de geração e irradiação permanece praticamente constante.

Quando se analisa o uso de SFVs *on-grid*, devido as próprias características intrínsecas do sistema, com geração limitada a horários com incidência de luz solar e ao objetivo dos consumidores de gerar créditos de energia que abatem grande parte do consumo mensal, instalações com SFV quase sempre injetam uma grande quantidade de potência ativa na rede de distribuição durante a manhã e a tarde.

2.1.2. Sistemas de Armazenamento

Devido a limitação do período de geração das fontes de energia renováveis, como energia solar e eólica, o uso de SA é altamente recomendado para garantir o suprimento de energia em horários de baixa ou nenhuma geração (A.Z.A. Shaqsi and Al-Hinai, 2020).

Essa associação pode trazer diversos benefícios para o sistema, como confiabilidade, conservação ambiental e economia monetária. A energia armazenada pode garantir o suprimento de energia em caso de faltas, vantagens tarifárias e também utilizar exclusivamente uma energia limpa (Energy.gov, 2021).

Um SA pode utilizar diversos tipos de tecnologias como elemento de armazenamento. Para o presente trabalho, o SA será composto por baterias de fosfato de ferro-lítio e suas características principais são: a capacidade de armazenamento, potência disponível, tempo de descarga, rendimento, profundidade de descarga e outros a depender da aplicação (Albuquerque, 2020).

2.1.3. Gerador à Diesel

Quando instalados em lugares que possuem um sistema de distribuição robusto, os geradores à diesel geralmente cumprem o objetivo de aumentar a confiança do fornecimento de energia, atuando como fonte supridora principal quando a rede de distribuição sofre com alguma falta.

Sua utilização conectada a rede de distribuição é restrita e não muito vantajosa. Possuindo um custo alto por kWh, o gerador à diesel é predominantemente utilizado como *backup*, necessitando sectionar sua zona de fornecimento da rede de distribuição.

3. METODOLOGIA

3.1 Ambiente de Modelagem

O OpenDSS é um *software* de código aberto capaz de solucionar problemas envolvendo o fluxo de carga para análises de um sistema elétrico em regime permanente. Sua estrutura possui flexibilidade para expandir suas funcionalidades, podendo agir em conjunto com outras ferramentas, como as linguagens de programação.

O OpenDSS é baseado em linhas de comando, podendo ser executado de três maneiras distintas, sendo estas a partir de: um arquivo executável (modo *StandAlone*), uma interface *Component Object Model* (COM) ou *scripts DLL* (R.C. Dugan and EPRI, 2021).

Através da interface COM, o usuário pode criar e executar novos modos de soluções e funções personalizadas a partir de um programa externo, permitindo a implementação de novas funcionalidades. Essa capacidade de ser associado com outras ferramentas permite modelagem adequada das características elétricas e dos recursos operacionais que uma rede dispõe. As estruturas condicionais das linguagens de programação aliada ao modo de simulação diário (*daily*) do OpenDSS, permitem que diversos controles sejam criados, por exemplo, as operações arbitrárias que a rede modelada pode sofrer.

3.1.1. Vsource

O objeto *Vsource* é utilizado para modelar fontes de tensão constante no OpenDSS. O objeto parte do equivalente de Thevenin e é basicamente uma fonte de tensão em série com uma impedância.

Os parâmetros comumente utilizados na criação do modelo são: Tensão de linha, em kV, e potência de curto circuito monofásico e trifásico, em MVA, ou o par R1 e X1, em ohms, sendo estes a resistência e a reatância de sequência positiva da fonte (R.C. Dugan and EPRI, 2021).

Neste trabalho, o objeto *Vsource* foi utilizado para representar a rede de distribuição, o gerador a diesel e o SA em modo isolado. Vale ressaltar que este objeto é o único no OpenDSS capaz de criar uma onda senoidal em uma zona isolada, sendo este o motivo da não utilização do objeto *Generator*, que não possui essa funcionalidade.

3.1.2. Load

O objeto *Load* no OpenDSS é responsável por modelar uma carga. Ele possui 6 modelos de carga disponíveis,

sendo: potência constante, impedância constante, corrente constante, potência ativa constante e reativa quadrática, potência ativa não linear e reativa quadrática e um modo especial ZIP (R.C. Dugan and EPRI, 2021). Neste trabalho apenas o modelo de potência constante foi utilizado para a modelagem da carga.

Os principais parâmetros utilizados na modelagem de uma carga no OpenDSS são: potência ativa e reativa ou potência aparente e fator de potência (*fp*), tensão nominal da carga e uma curva de carga que represente o comportamento dessa carga ao longo do dia, mês ou ano. Para a simulação de uma carga trifásica desbalanceada, foram utilizados três objetos *Load* monofásicos, cada um contendo seus próprios parâmetros e *Loadshape*.

Para este trabalho, as curva de carga utilizada nos objetos *Load* foram originadas a partir das medições realizadas na carga do objeto de estudo, detalhado melhor na seção 3.2.1. Como a análise será feita a cada dia, as medições daquele dia foram utilizadas para gerar a *Loadshape*. A construção e atribuição das *Loadshapes* foram realizadas através do Python, gerando um ambiente mais escalável.

3.1.3. PvSystem

O objeto *PvSystem* modela um SFV no OpenDSS, tendo seu diagrama de blocos apresentado na Fig. 1. Ele possui três conjuntos de parâmetros, cada um deles modelando as características dos módulos do sistema fotovoltaico, do inversor e das condições de operação do sistema. Vale ressaltar que o *PvSystem* representa o equivalente CA de um SFV (P. Radatz and Sunderman, 2020).

As características dos módulos fotovoltaicos se referem ao ponto de máxima potência e a curva P-T, sendo esta curva representando o fator de eficiência de geração com a temperatura de célula.

As propriedades referentes ao inversor impactam nos parâmetros de eficiência de conversão, com a curva *EffCurve*, as características de ligação com o lado CA e o controle de operação do SFV, como limite mínimo e máximo de geração e o fator de potência do sistema.

O último conjunto de parâmetros se refere as curvas irradiação e a temperatura diárias nas quais o SFV está exporto. Com base nelas, o SFV calculará a potência de geração a cada intervalo de simulação. Essas curvas são geradas com base no banco de dados apresentado na seção 3.2.2.

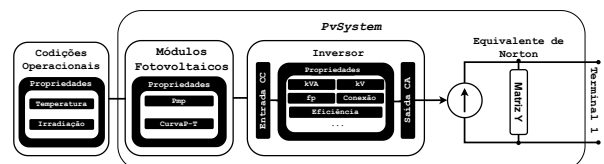


Figura 1. Diagrama de blocos do modelo de um SFV no OpenDSS.

3.1.4. Storage

O objeto *Storage* representa um SA no OpenDSS. Ele é modelado como uma carga de potência constante, durante

a recarga, e como um gerador que pode injetar potência na rede, durante a descarga. Em ambos os casos, o objeto está sujeito a potência nominal, sua energia armazenada e sua configuração. A Fig. 2 mostra o modelo de um elemento de armazenamento no OpenDSS (C. Rocha and Radatz, 2020b).

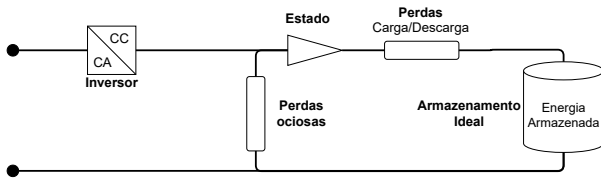


Figura 2. Diagrama de blocos do modelo de um elemento de armazenamento de energia no OpenDSS.

Somente um objeto *Storage* não seria suficiente para representar todas as características que um SA possui, visto que, no OpenDSS, este objeto não é capaz de trabalhar em cenários com rede isolada.

Visando contornar esta limitação, um objeto *Vsource* foi criado para substituir o objeto *Storage* durante o cenário de ilhamento, ou seja, quando o sistema de armazenamento deve ser a fonte principal de alimentação da rede.

Utilizando estruturas condicionais do Python, esta alteração é realizada conservando as configurações de profundidade de descarga e a informação da quantidade de energia do SA.

Outro modo de controlar um objeto *Storage* é a partir de um *InvControl* e *StorageController*, que possuem as principais funções dos carregadores/inversores do mercado, como *Peak Shave*, *Schedule*, *Volt-Var*, *Volt-Watt* e algumas outras (P. Radatz and Sunderman, 2020)(C. Rocha and Radatz, 2020a).

3.1.5. Demais Equipamentos

Equipamentos auxiliares, como linhas, transformadores e chaves seccionadoras, foram modelados a partir dos objetos *Line*, *Transformer* e *Switch*, respectivamente.

3.2 Fonte de Dados

Além da modelagem discutida nos tópicos anteriores, as quais são responsáveis por garantir a paridade das características elétricas e recursos operacionais do modelo com a rede estudada, é necessário o conhecimento das variações do ambiente no qual o objeto de estudo está inserido, como variações na condição meteorológicas e a sazonalidade do consumo de energia elétrica.

3.2.1. Dados de Consumo e Geração

A fonte de dados utilizada para a obtenção das características de consumo da rede foram originadas nos sistemas de medições do CEAMAZON, que realiza medições em diversos pontos do sistema, como inversores, quadro de cargas e secundário do transformador abaixador. A rede elétrica do CEAMAZON é o objeto de estudo deste trabalho e será apresentada em mais detalhes na seção 4.

Os dados utilizados para a criação do perfil de consumo são espaçados em um intervalo de 10 minutos, onde abastecerão as *Loadshapes* dos objetos *Loads*. Os dias do mês outubro e novembro de 2021 serão utilizados como referência.

Os dados de geração foram coletados pelos inversores presentes no sistema e pelo controlador de carga do barramento CC presente no objeto de estudo. Esses dados de geração serão utilizados somente para a validação dos resultados obtidos pelas simulações.

3.2.2. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos através do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a região de Belém no mês de outubro e novembro de 2021.

Os dados necessários para criação do modelo são a temperatura de célula, em °C, e a irradiação, em kW/m². O banco de dados do INMET disponibiliza a temperatura ambiente, em °C, e a radiação global, em kJ/m², a cada hora.

Vale ressaltar que, como a medição de irradiação e temperatura não é realizada no mesmo local geográfico da instalação dos módulos fotovoltaicos, estes parâmetros são prováveis fontes de erro e sua utilização deve ser validada. Este fato terá grande impacto nos resultados apresentados na seção 5.

4. MINIRREDE SIMULADA

O CEAMAZON foi criado a partir da união de professores e pesquisadores da UFPA apoiados pela Eletrobras em 02/06/2006. O convênio resultou na construção de um prédio com 1800 m² e na implantação de 8 laboratórios de pesquisa e extensão na área de eficiência energética (CEAMAZON, 2020).

Devido sua grande atuação em projetos de P&D, o CEAMAZON participa de um ambicioso projeto chamado de Sistema Inteligente de Gestão Eficiente de Mobilidade Elétrica Multimodal, ou também chamado de Sistema Inteligente Multimodal da Amazônia (SIMA) (NESA, 2019). Em sua primeira etapa, este projeto foi responsável pela implementação dos SFVs, SA e dos dispositivos relacionados ao estudo de um sistema abastecido por energia solar com armazenamento de energia. Posteriormente, o projeto realizou obras de infraestruturação do Campus Guamá da UFPA para o recebimento de um ônibus e um barco elétricos (UFPA, 2020). O estudo foi possível também através do Sistema de Gestão de Energia e Eficiência Energética da UFPA (SISGEE). Ambos os projetos são realizados pelo CEAMAZON.

Com a implementação da primeira etapa do projeto, o CEAMAZON conta com três SFVs, um SA, um gerador à diesel e outros dispositivos elétricos em sua instalação. A Fig. 3 apresenta a topologia da rede do CEAMAZON, dando ênfase as conexões e tensões presentes no sistema.

A seguir os componentes da rede elétrica do CEAMAZON serão apresentados.

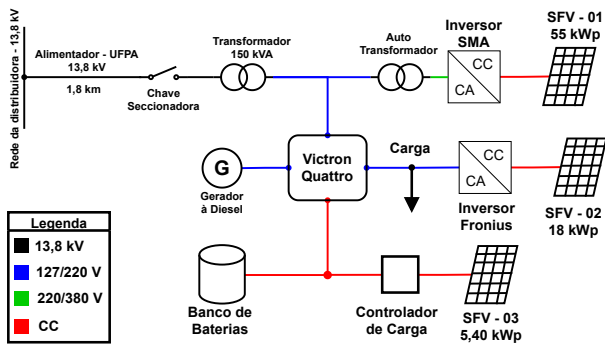


Figura 3. Topologia da rede elétrica do CEAMAZON.

4.1 Conexão: Alimentador UFPA x CEAMAZON

A rede do CEAMAZON é acoplada a rede de distribuição de energia através de um alimentador da UFPA. Situado a aproximadamente 1,8 km da cabine de medição, o CEAMAZON possui um transformador abaixador na proporção de 13,8/0,22 kV com 150 kVA de potência instalada.

Como o CEAMAZON possui alta penetração de GD em sua instalação interna, resultando em, durante o período de luz solar, uma grande injeção de energia ativa na no alimentador universitário. Essa penetração, porém, é pouco significativa em relação as cargas do alimentador da UFPA, possuindo grandes consumidores próximos ao CEAMAZON, como o Hospital Betina Ferro.

4.2 Victron Quattro

Os inversores Victron Quattro são peças fundamentais para o controle da rede do CEAMAZON. Cada inversor tem potência nominal de 10 kVA, porém, atuando de forma conjunta, o sistema resultante criado possui 60 kVA trifásicos. Na prática, o conjunto de inversores Victron Quattro atuam como um só, facilitando a configuração do sistema. Doravante, os inversores Victron Quattro serão tratados como uma unidade.

O Victron Quattro conecta e controla diversos dispositivos da rede do CEAMAZON. Suas portas CA e CC são altamente monitoradas e são capazes de ter seu fluxo de potência controlado pelo inversor. O controle e carregamento do SA é totalmente controlado pelo Victron Quattro.

4.3 Carga do CEAMAZON

O prédio do CEAMAZON possui diversos laboratórios, sendo estes as únicas cargas do sistema. Seu abastecimento é realizado em ligação trifásica a 127/220 V e se conecta à saída CA principal do Victron Quattro. O consumo energético do CEAMAZON será tratado como um única carga desbalanceada neste trabalho.

4.4 Sistemas Fotovoltaicos

O CEAMAZON possui aproximadamente 78 kW de potência instalada em módulos fotovoltaicos. Esses módulos são divididos em três SFVs e, embora instalados geograficamente próximos e utilizem exclusivamente o módulo BYD 335PHK-36-4BB de 335 Wp, possuem funções únicas dentro da rede.

O primeiro SFV do CEAMAZON, chamado de SFV-01 doravante, possui a maior potência instalada entre os SFVs com o total de 54,94 kWp. A conexão com a rede CA é realizada através do inversor SMA SUNNY TRIPOWER CORE1 de 50 kW de potência nominal e tensão nominal para o ajuste da tensão de referência do sistema, 220/127 V. Após a transformação, a conexão é feita no secundário do transformador principal e a montante do Victron Quattro. Portanto, o Victron Quattro não distingue a energia proveniente do SFV-01 ou do transformador rebaixador.

Devido a magnitude de sua potência de geração, o SFV-01 fica fora da zona de controle do Victron Quattro, evitando sobrecarga e danos aos demais equipamentos. Logo, em caso de contingências, a geração deste SFV é cessada.

O segundo SFV do CEAMAZON, chamado de SFV-02 doravante, possui 18,09 kWp de potência instalada e tem sua conexão com a rede CA realizada através do inversor Fronius SYMO 15.0-3-M de 15 kW de potência nominal. O inversor se conecta à saída principal CA do Victron Quattro. Portanto, este SFV está em paralelo com a carga do prédio do CEAMAZON.

O terceiro SFV do CEAMAZON, chamado de SFV-03 doravante, possui a menor potência instalada entre os SFVs com 5,36 kWp no total. Diferente dos outros SFVs citados anteriormente, o SFV-03 é conectado à porta CC do Victron Quattro, em paralelo com o SA e através de controlador de carga, tendo sua energia de geração predominantemente utilizada para carregar o SA. Quando o SA está totalmente carregado, o excedente de energia será aproveitado pelo restante do sistema.

4.5 Sistema de Armazenamento

O SA do CEAMAZON é composto por 8 baterias do modelo B-BOX PRO 13,8 com 13,8 kWh por bateria, em 48 V e associadas em paralelo. A capacidade total do SA é de 110,4 kWh.

O gerenciamento total do banco de baterias é realizado pelo Victron Quattro. Atualmente, o SA está configurado com a opção de *Schedule Charger*. Esta configuração permite a criação de uma escala de horários nos quais o Victron Quattro poderá injetar potência no barramento CC.

Quando em horário não contemplados na escala de carregamento e quando o nível de carregamento está acima da reserva, o SA assume papel de fonte de energia principal da instalações do CEAMAZON, restringindo a energia proveniente de suas entradas CAs. O mesmo ocorre quando a rede de distribuição sofre uma falta, o Victron Quattro secciona a sua entrada CA principal e cria uma zona isolada alimentada pelo SA

4.6 Gerador à Diesel

O CEAMAZON possui um gerador à diesel do modelo Cummins®C50D6 com potência nominal de 50 kW e fator de potência de 0,8. A saída do C50D6 é trifásica de 220/127 V.

De modo geral, o funcionamento do C50D6 ocorre em contingências de longa duração, após a consequente chegada ao limite de descarga do SA.

5. RESULTADO

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos no trabalho.

5.1 Sistemas Fotovoltaicos

Devido a falta da medição de irradiação solar e temperatura ambiente no local de instalação dos SFV, os dados utilizados para gerar as curvas de irradiação, temperatura e curva P-T representaram um fator de imprecisão, necessitando de atenção nas condições meteorológicas do dia estudado.

Mesmo com os dados provenientes da estação meteorológica do INMET em Belém, situações como chuvas localizadas, pequenas nuvens, ventos e outros fatores podem gerar cenários diferentes nessas duas localidades, estação meteorológica e instalação do CEAMAZON.

A Fig. 4 apresenta a potência de geração para cada SFV no dia com maior horas de sol pleno (HSP) do mês de outubro, dia 19 de outubro de 2021, comparando o dado simulado, em tracejado, e medido, em linha contínua.

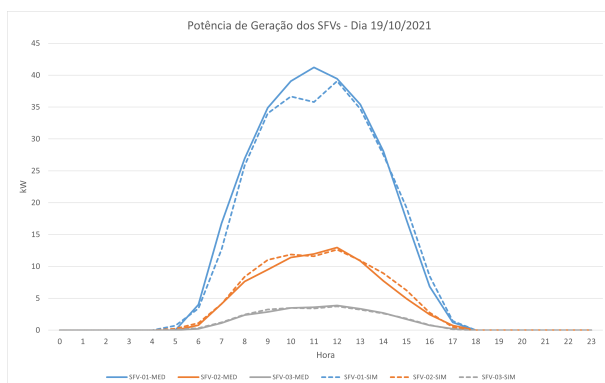


Figura 4. Potência de geração, medida e simulada, dos SFVs do CEAMAZON no dia 19/10/2021.

A partir da comparação das curvas de potência de geração, medidas e de simuladas, é possível notar que próximo as 11 horas da manhã ocorre uma diminuição na geração dos SFVs simulados. Entretanto, esse comportamento não é observado nos dados de medição. Tal fato pode ser explicado pela passagem de uma nuvem pela estação meteorológica ou qualquer outro fator, como um vento que resfrie a temperatura dos módulos fotovoltaicos e gere uma consequente melhora na eficiência de geração ou qualquer outro fator localizado.

A Tabela 1 compara os valores de geração obtidos através das medições dos inversores de cada SFV e dos valores obtidos através da simulação do dia 19/10/2021.

Diferente do cenário ensolarado, onde há pouca ocorrência de efeitos localizados como formação de nuvens, em dias parcialmente nublados ocorre o inverso e há um aumento na imprecisão entre as condições meteorológicas entre a fonte de dados e o CEAMAZON.

A Fig. 5 apresenta a potência de geração para cada SFV no dia de menor HSP do mês de outubro, dia 10 de outubro de 2021, utilizando valores medidos e simulados.

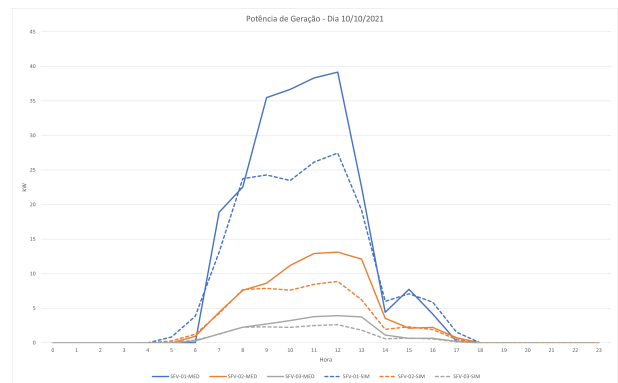


Figura 5. Potência de geração, medida e simulada, dos SFVs do CEAMAZON no dia 10/10/2021.

Diferente do dia ensolarado, a semelhança mais pronunciada na Fig. 5 é a diminuição de geração dos SFVs às 14 horas, ocorrendo tanto na simulação quanto na medição. Nota-se o cenário caótico, onde nem mesmo instalações com sede no mesmo município possuem condições meteorológicas muito semelhantes. O erro foi em média 23% para a geração de energia diária.

5.2 Sistema de Armazenamento de Energia

5.2.1. SA - Cenário On-grid

O SA do CEAMAZON está configurado com a escala de carregamento da função *Schedule Charger*, configurada para carregar o SA durante os dias úteis da semana nos horários com o posto tarifário "fora de ponta" (FDPT) e descarregar no período "na ponta" (NPT). Em finais de semana, quando o posto tarifário é totalmente FDPT, o SA pode carregar a qualquer momento. Esta configuração garante uma economia monetária devido a diferença do preço da energia nos períodos citados, FDPT com energia mais barata e NPT com energia mais cara.

O dia 19/10/2021 foi utilizado para validar o funcionamento do SA no modo *on-grid*, pois, é um dia no qual o SA atuou desta maneira e, como mostrado na seção 5.1, é um dia ensolarado que apresentou uma simulação satisfatória dos SFVs.

A Fig. 6 apresenta o comportamento do SA no dia 19/10/2021. Na etapa de carregamento, percebe-se que o SA iniciou o dia com aproximadamente 45% de sua capacidade máxima e ao longo do período FDPT ele foi se carregando a taxa de 4,2 kW. A medição revela que próximo as 18:00 o SA atinge a sua capacidade máxima de armazenamento e então cessa o carregamento. Porém, o SA

Tabela 1. Geração Diária dos Sistemas Fotovoltaicos - Dia ensolarado.

SFV	Medição (kWh)	Modelado (kWh)	Erro (%)
SFV-01	292,22	279,49	4,36%
SFV-02	85,11	90,25	6,04%
SFV-03	26,28	26,60	1,22%

simulado atingiu 94% de sua capacidade apenas as 18:30, apresentando uma diferença de 9 kWh armazenados. No período NPT, 18:30 as 21:30, o SA proveu toda a energia demandada pela carga.

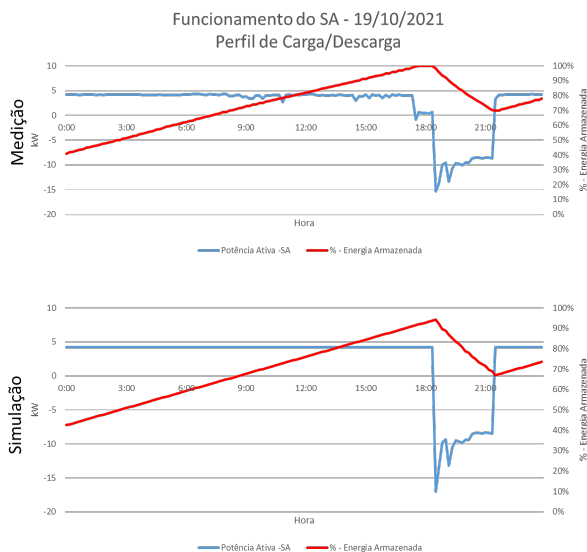


Figura 6. Perfil de carga e descarga do SA no dia 19/10/2021, com dados de medição e os simulados.

Esta configuração garantiu uma economia de 30% dos custos de energia elétrica neste dia. Caso houvesse a injeção de toda energia do SA na rede de distribuição, invés de apenas diminuir os custos do consumo do CEAMAZON, o SA garantiria saldo positivo no período NPT na magnitude de 51,32 kWh ou R\$ 142,68 por dia (Equatorial, 2021).

5.2.2. SA - Cenário isolado

A partir do seccionamento da sua entrada CA principal, o Victron Quattro cria uma zona isolada suprida pelo SA ou pelo gerador à diesel, com ambas as fontes podendo receber o auxílio da geração dos SFV-02 e SFV-03. Vale ressaltar que o SFV-01 fica fora da zona isolada.

Considerando uma falta prolongada na rede de distribuição, o SA é capaz de suprir a carga do CEAMAZON em média pelas 12 horas iniciais de dias úteis e pelo dia inteiro em finais de semana e feriados, sendo auxiliado pela geração dos SFV-02 e SFV-03 em um dia ensolarado.

O dia 11/11/2021 registrou uma falta da rede de distribuição de energia no período das 04:50 as 07:50 da manhã. A partir da atuação do Victron Quattro, a rede do CEAMAZON foi isolada e a nova fonte supridora foi o SA. A Fig. 7 apresenta uma comparação do perfil de carga e descarga do SA no dia 11/11/2021, atuando como fonte principal do CEAMAZON duas vezes no dia, para evitar uma contingência e para atender a carga no período NPT.

Nota-se a grande similaridade entre as curvas, revelando a paridade de operação do modelo criado com a rede em campo. O erro no balanço energético diário ficou em torno de 5% para a fase de carregamento e de 17% para a fase de descarregamento, sendo a segunda bastante afetada pela diferença de geração dos SFVs simulados e medidos.

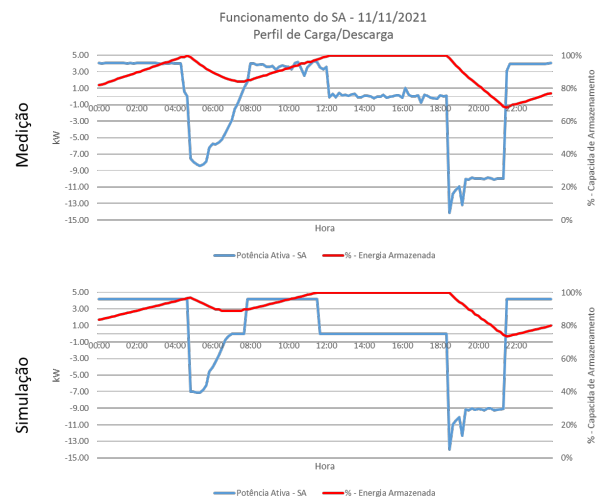


Figura 7. Perfil de carga e descarga do SA no dia 11/11/2021, com dados de medição e os simulados.

5.3 Conexão: Alimentador UFPA x CEAMAZON

A Fig. 8 apresenta o perfil de consumo e geração do CEAMAZON a partir da visão do alimentador da UFPA para o dia 19/10/2021, comparando o resultado obtido pela simulação, em laranja, e os dados da medição, em azul, em um dia útil ensolarado do mês de outubro.

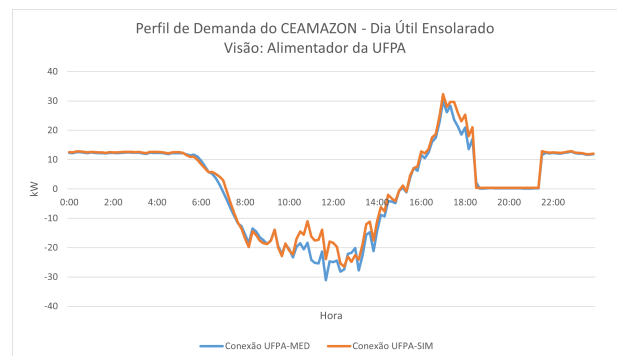


Figura 8. Perfil de demanda do CEAMAZON na visão da rede de distribuição da UFPA em dia útil ensolarado.

Nota-se uma curva típica de instalações com GD, consumindo energia da rede de distribuição durante a madrugada e noite e injetando o excedente de geração durante a manhã e tarde. Percebe-se também a similaridade do comportamento entre as duas curvas, destoando apenas próximo ao meio dia devido a diferença de geração dos SFVs, como apresentado na seção 5.1. O período de 18:30 as 21:30 chama bastante atenção devido a mudança abrupta de comportamento causada no momento em que o SA assume como fonte principal de energia, sendo este comportamento discutido na seção 5.2.

Por se tratar de um ponto estratégico que representa a soma do comportamento de todos os dispositivos do CEAMAZON, o resultado obtido foi satisfatório. A diferença do balanço energético diário foi de 6% para o consumo e de 12% para a injeção.

A partir da simulação, obteve-se a matriz energética do CEAMAZON, sendo apresentada na Fig. 9 para dias úteis.

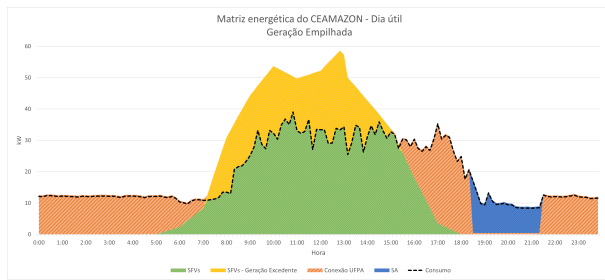


Figura 9. Matriz energética do CEAMAZON em dia útil ensolarado obtido através de simulação.

Nota-se que a geração diária dos SFVs em dias ensolarados é suficiente para gerar um balanço energético positivo, sendo possível abastecer a carga e carregar o SA sem recorrer a rede de distribuição. Porém, como seu período de geração é dependente da luz solar, o CEAMAZON acaba consumindo energia durante a madrugada e noite e injetando o excedente de geração dos SFVs durante a manhã e a tarde. Essa geração excedente atinge 27 kW de potência ativa reversa e garante um total de 127,14 kWh de energia em dias úteis e, 51 kW e 320,65 kWh em finais de semana.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho criou um modelo das instalações elétricas do CEAMAZON, conservando suas características elétricas e seus recursos operacionais, sendo capaz de validar o resultado de simulações com medições e de comportamentos esperados.

As simulações proporcionaram a visualização detalhada do funcionamento do objeto de estudo em diversos cenários, possibilitando a análises que permitem futuras tomadas de decisões.

Os resultados mostraram que houve uma aproximação satisfatória dos dados de simulação com as medições da rede, principalmente em dias ensolarados quando as condições meteorológicas da região eram menos caóticas, sinalizando uma diferença entre a geração diária real e a simulada por volta de 5% em dias ensolarados e por volta de 23%.

Foi possível analisar também o comportamento da rede em cenário de contingência, dando margem para planejamento da expansão do sistema e atualização da topologia da rede. Após a análise da simulação do SA em cenário on-grid, foi possível identificar uma nova medida operacional para o SA, consistindo na injeção da totalidade da energia armazenada no SA durante o período NPT, garantindo créditos de energia neste posto tarifário.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a ao projeto SIMA, PD-07427-0319/2019, realizado pela Norte Energia S.A em parceria com o CEAMAZON, ao projeto SISGEE e a PROAD-UFGA.

REFERÊNCIAS

Ackermann, T. et al. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, 57(3), 195–204.

- Albuquerque, B. (2020). Utilização de métodos ativos na transformação de um prédio em um edifício de energia zero: Estudo de caso da biblioteca central da universidade federal do Pará. *UFPA*.
- ANEEL (2015). Geração distribuída. URL <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acessado em: 20-12-2021.
- A.R. Amelia, Y.I. et al. (2016). Investigation of the effect temperature on photovoltaic (pv) panel output performance. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 6(5), 682–688.
- A.Z.A. Shaqsi, K.S. and Al-Hinai, A. (2020). Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*.
- C. Rocha, J.P. and Radatz, P. (2020a). *Storage Controller Element*. EPRI.
- C. Rocha, J.P. and Radatz, P. (2020b). *Storage Element*. EPRI.
- CEAMAZON (2020). CEAMAZON nossa história. URL https://www.ceamazon.com.br/menu-ceamazon/nossa_historia.php. Acessado em: 10-01-2022.
- Energy.gov (2021). Energy.gov energy storage: The key to a reliable, clean electricity supply. URL energy.gov/articles/. Acessado em: 08-01-2022.
- EPE (2021). *Balanco Energético Nacional - 2021*. Ministério de Minas e Energia.
- Equatorial (2021). Equatorial Para valores de tarifas. URL <https://pa.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/>. Acessado em: 05-12-2021.
- NESA (2019). Norte Energia S.A. mobilidade elétrica. <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/ped/mobilidade-eletrica>. Acessado em: 03-01-2022.
- P. Radatz, C.R. and Sunderman, W. (2020). *OpenDSS PVSystem and InvControl Element Models*. EPRI.
- Razavi, S.E. et al. (2019). Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 157–167.
- R.C. Dugan, D.M. and EPRI (2021). *OpenDSS - Reference Guide*. EPRI.
- Tavares, M. (2018). Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica com diferentes níveis de penetração em alimentadores de distribuição em média tensão utilizando openss. *SBSE*.
- UFGA (2020). Assessoria de Comunicação da UFGA sistema inteligente multimodal da amazônia recebe ônibus elétrico. URL <https://portal.ufpa.br/index.php/ultimas-noticias2/>. Acessado em: 10-12-2021.
- V.B. Andrade, U.P.J. et al. (2020). Modelagem de um sistema de distribuição real desbalanceado e análise do impacto da geração distribuída utilizando o software openss. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 1(1).