Modelagem de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica a Partir da Base de Dados Geográfica da ANEEL

Santos B. S. B. R. P. * **Junqueira C. M. S.** *

* *Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, BA, Brasil (e-mail: brendesonsabarreto@aluno.ufrb.edu.br; caio.junqueira@ufrb.edu.br).*

Abstract: This work presents a methodology for modeling electrical distribution systems (EDS) using the Geographic Database of the Distributor (BDGD) from the National Electric Energy Agency (ANEEL). Two software tools were used: QGIS for importing and analyzing the database of electrical network components, and OpenDSS for implementing the EDS and analyzing power flow. The methodology was applied to the medium voltage EDS of the city of Cruz das Almas, Bahia, including power flow analysis and the geographical arrangement of network components. The power flow results revealed losses of 0.8% in the feeder and adequate voltage levels for load operation. Finally, the methodology shows potential for modeling other EDS present in the BDGD for planning and efficient operation studies of these systems.

Resumo: Este trabalho apresenta uma metodologia para modelagem de sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) utilizando a Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para isso, foram utilizados dois *softwares*: QGIS, para importação e análise da base de dados dos componentes da rede elétrica; OpenDSS para implementação do SDEE e análise do fluxo de potência. A metodologia foi aplicada ao SDEE de média tensão da cidade de Cruz das Almas, Bahia, com a análise do fluxo de potência e a disposição geográfica dos componentes de rede. Os resultados de fluxo de potência revelaram perdas no alimentador de 0,8% e níveis de tensão adequados para a operação das cargas. Por fim, a metodologia apresenta um potencial na modelagem de outros SDEE presentes na BDGD para estudos de planejamento e operação eficiente desses sistemas.

Keywords: Modeling; Distribution Networks; BDGD; OpenDSS; QGIS.
Palavras-chaves: Modelagem; Redes de Distribuição; BDGD; OpenDSS; QGIS.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) desempenham um papel vital no Sistema Interligado Nacional (SIN), fornecendo energia aos consumidores finais e respondendo às demandas dinâmicas do sistema. Tradicionalmente, essas redes operam de forma radial, por meio de um fluxo unidirecional de energia das centrais geradoras para as cargas (Bottazzi, 2022). No entanto, o aumento da complexidade dos sistemas de distribuição, exemplificado pela inserção da geração distribuída (GD), tem introduzido uma camada adicional ao estudo do fluxo de potência, desafiando as práticas convencionais de planejamento e operação das redes. A modelagem precisa desses sistemas desempenha um papel crucial na compreensão e análise do fluxo de energia, permitindo uma representação detalhada das características e componentes da rede (Nascimento et al., 2020).

Diversas ferramentas de simulação estão disponíveis para estudos em SDEE, cada uma com sua finalidade específica. O *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) se destaca na simulação de SDEE, oferecendo valiosos *insights* sobre perdas de energia e níveis de tensão. Amplamente adotado por concessionárias, pesquisadores e consultores, o OpenDSS facilita a modelagem detalhada de sistemas elétricos, ajudando no planejamento e otimização da infraestrutura elétrica globalmente (ANEEL, 2014). No entanto, a obtenção de dados reais para simulações pode ser desafiadora, ressaltando a importância de fontes confiáveis (Souza et al., 2020). Apesar de sistemas-teste padronizados, como os modelos de 13, 34 e 37 barras propostos pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) (OpenDSS, 2024), serem úteis, eles não refletem totalmente a realidade das redes de distribuição brasileiras, exigindo adaptações e validações específicas para o contexto local (Holzbach et al., 2022).

Em 2021, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu diretrizes para o uso da Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD) por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST). Essa regulamentação possibilitou a modelagem de qualquer rede nacional contida no banco de dados (Souza, 2021). No entanto, obter dados reais da rede, como medições de tensão em pontos específicos, pode ser um desafio, o que torna a modelagem crucial para antecipar o comportamento da rede e identificar problemas operacionais (Santos Junior,

2022). Além disso, a Portaria nº 6.785/2022 da ANEEL estabeleceu o Plano de Dados Abertos (PDA) para 2022-2024, tornando a BDGD acessível ao público (ANEEL, 2022). Com esses dados, o OpenDSS se destaca como uma ferramenta importante para a modelagem e simulação de SDEE, contribuindo para a análise e planejamento do SDEE nacional.

Os dados da BDGD são fornecidos em um formato que exige um software especializado em dados geográficos para a visualização e análise dos SDEE. O QGIS, um software gratuito e amplamente utilizado, é uma ferramenta eficaz para essa tarefa. Com o QGIS, é possível realizar análises geoespaciais detalhadas e visualizar dados em formato de mapa (Hoffmann et al., 2018), o que é essencial para entender a topologia das redes elétricas, identificar pontos de conexão e avaliar a distribuição de cargas (Santos Junior, 2022).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para a modelagem de redes de distribuição no OpenDSS, utilizando dados obtidos da BDGD, importados no QGIS. Ao final, será conduzido um estudo de caso com base em um sistema real da cidade de Cruz das Almas, localizada na Bahia, a fim de demonstrar a aplicação prática da metodologia proposta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção introduz os conceitos-chave utilizados no trabalho. Inicialmente é apresentada a BDGD, essencial para modelagem de alimentadores de SDEE. Além disso, é apresentado o *software* QGIS, utilizado para análise geoespacial. Ao final é apresentado o *software* OpenDSS, para simulação de sistemas elétricos.

2.1 Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD)

A BDGD é uma parte essencial do Sistema de Informação Geográfico Regulatório da distribuição (SIG-R), estabelecido pela ANEEL. Seu propósito central é fornecer uma representação simplificada, porém precisa, do SDEE, abrangendo tanto a situação atual dos ativos quanto informações técnicas e comerciais relevantes (ANEEL, 2022). Para garantir a coerência e padronização das informações, as distribuidoras devem seguir modelos, requisitos e padrões estabelecidos no Módulo 10 do PRODIST e no Manual de Instruções da BDGD (ANEEL, 2022).

A BDGD é estruturada em diversas entidades, cada uma representando um aspecto específico do sistema elétrico. Algumas das principais entidades incluem: SUB, Subestação; CTAT, Circuito de Alta Tensão; CTMT, Circuito de Média Tensão; EQTRMT, Equipamento Transformador de Média Tensão; UNTRAT, Unidade Transformadora de Alta Tensão; UNTRMT, Unidade Transformadora de Média Tensão; SSDMT, Segmento do Sistema de Distribuição de Média Tensão; SSDBT, Segmento do Sistema de Distribuição de Baixa Tensão; UCMT, Unidade Consumidora de Média Tensão; UCBT, Unidade Consumidora de Baixa Tensão (ANEEL, 2021a).

O manual de instruções da BDGD fornece uma descrição detalhada dos parâmetros associados a cada entidade dentro da base de dados, conforme mencionado anteriormente. Na Tabela 1, são apresentadas algumas das características específicas da entidade denominada UNTRMT (ANEEL, 2021a).

Tabela 1. Dados da entidade UNTRMT.

Campo	Descrição
COD_ID	Código da unidade transformadora
DIST	Código da distribuidora ANEEL
SUB	Código da subestação
PAC	Ponto de acoplamento comum elétrico
POT_NOM	Potência nominal (kVA)
PER_FER	Perda no ferro (W)
PER_TOT	Perda total (W)

Portanto, o manual descreve o modelo de dados da BDGD, abrangendo seu dicionário, procedimentos de geração, validação e transmissão de dados, além das respostas à ANEEL. O objetivo é assegurar conformidade aos padrões, facilitar a validação, agilizar atualizações e eliminar o reenvio de informações, otimizando a eficiência e reduzindo interações entre a ANEEL e os agentes envolvidos (ANEEL, 2023).

2.2 Quantum Geographic Information System (QGIS)

O QGIS é um *software* de código aberto amplamente utilizado para análise espacial, visualização de dados geográficos e criação de mapas (QGIS, 2024). Desenvolvido inicialmente em 2002 por Gary Sherman, o QGIS tem como objetivo fornecer uma plataforma acessível e poderosa para usuários de todos os níveis de habilidade (QGIS, 2024).

O QGIS permite integrar diversas fontes de dados externos, como imagens de satélite e informações topográficas, possibilitando uma análise completa do ambiente do sistema elétrico (Clemente et al., 2017). Além disso, o QGIS viabiliza a importação de arquivos da BDGD, conectando-os a um mapa. Essa funcionalidade simplifica a integração de informações de localização com dados descritivos, oferecendo um contexto geoespacial detalhado para a análise dos SDEE (Jiang et al., 2020). A Figura 1 ilustra um exemplo prático dessa integração no QGIS.

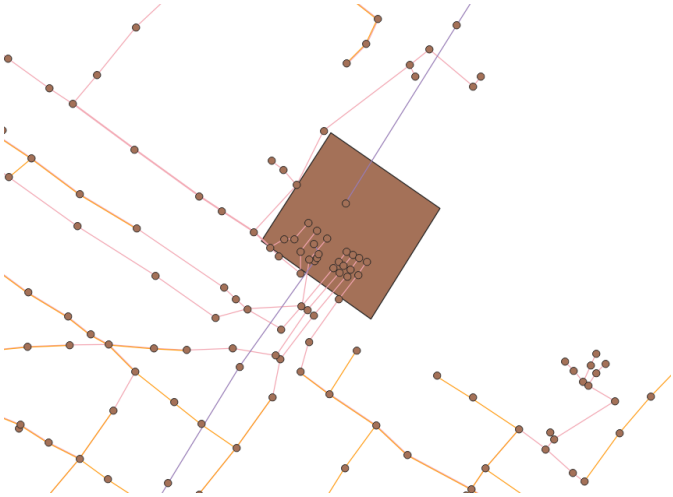

Figura 1. Exemplo da BDGD importada no QGIS.

A análise do comportamento do sistema elétrico em diversas condições operacionais e de carga é crucial para

entender o fluxo de potência nos SDEE e garantir um planejamento eficaz da infraestrutura de energia. A integração entre os softwares QGIS e OpenDSS desempenha um papel essencial ao fornecer dados geoespaciais para a modelagem e uma plataforma eficiente para análise, planejamento e otimização da infraestrutura (Clemente et al., 2017). Essa sinergia entre QGIS e OpenDSS contribui para a gestão e operação eficientes do sistema elétrico.

2.3 Open Distribution System Simulator (OpenDSS)

O OpenDSS, uma ferramenta de simulação de sistemas de energia elétrica, desenvolvida originalmente pela *Electrotek Concepts* em 1997 e posteriormente adquirida pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) em 2007, representa uma contribuição significativa para a análise e planejamento de sistemas elétricos (Thurner et al., 2018). Este *software*, de código aberto, é amplamente utilizado para modelar SDEE e conduzir análises relacionadas ao planejamento e qualidade de energia (Holzbach et al., 2022).

O OpenDSS pode ser implementado em duas variantes. A primeira é uma implementação do *Component Object Model* (COM), disponibilizada como um programa executável que opera por meio de linhas de comando. Isso permite que os usuários descrevam circuitos, resolvam problemas e visualizem resultados. A segunda variante consiste em um servidor construído a partir de uma *Dynamic Link Library* (DLL), que pode ser integrado a uma variedade de *softwares* existentes. Essa integração é viável devido à capacidade do OpenDSS de se comunicar com linguagens de programação como Python e C++, além de ferramentas da MS Office (Holzbach et al., 2022).

Na modelagem utilizando o OpenDSS, os elementos-chave do sistema elétrico são representados por meio dos seus parâmetros. A modelagem inicia-se com a definição de um barramento de referência, representado por um equivalente de Thevenin. Os principais parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 2 (Brown et al., 2018).

Tabela 2. Parâmetros do barramento no OpenDSS.

Parâmetro	Descrição
basekv	Tensão Base em kV
phases	Fases
frequency	Frequência
mvasc3	Potência de Curto-Circuito trifásica
mvasc1	Potência de Curto-Circuito monofásica

As linhas de distribuição, por sua vez, são modeladas por meio do modelo de linha curta, utilizando dados específicos, conforme descrito na Tabela 3 (Thurner et al., 2018).

Tabela 3. Parâmetros das Linhas da Rede.

Parâmetro	Descrição
bus1	Número do barramento inicial
bus2	Número do barramento
length	Comprimento em unidades específicas
linecode	Define as características elétricas da linha

Os transformadores são modelados com base em informações específicas fornecidas. Os comandos de modelagem incluem uma variedade de parâmetros, conforme apresentado na Tabela 4 (Thurner et al., 2018).

Tabela 4. Parâmetros dos Transformadores.

Parâmetro	Descrição
xhl	Impedância percentual nos enrolamentos
windings	Número de enrolamentos
%loadloss	Perda de carga percentual carregado
%noloadloss	Perda de carga percentual não carregado
kV	Tensão nominal em kilovolts
kVA	Capacidade nominal em kilovolt-amperes
conn	Configuração de conexão do transformador

Já as cargas, que representam a demanda de energia elétrica dos consumidores finais, são modeladas com base em informações específicas, conforme detalhado na Tabela 5 (Thurner et al., 2018).

Tabela 5. Parâmetros das Cargas.

Parâmetro	Descrição
phases	Número de fases da carga
model	Modelo de carga utilizado na simulação
bus	Número do barramento de conexão
kV	Tensão nominal da carga em kilovolts
pf	Fator de potência da carga
kW	Demanda ativa da carga em kilowatts

O *software* OpenDSS oferece uma representação visual do sistema, proporcionando uma compreensão das características geográficas da rede de distribuição, assim como a intensidade do fluxo de potência ao longo dessa rede. Como exemplificado na Figura 2, apresenta o sistema de 13 barras do IEEE, facilitando a capacidade de interpretação dos resultados.

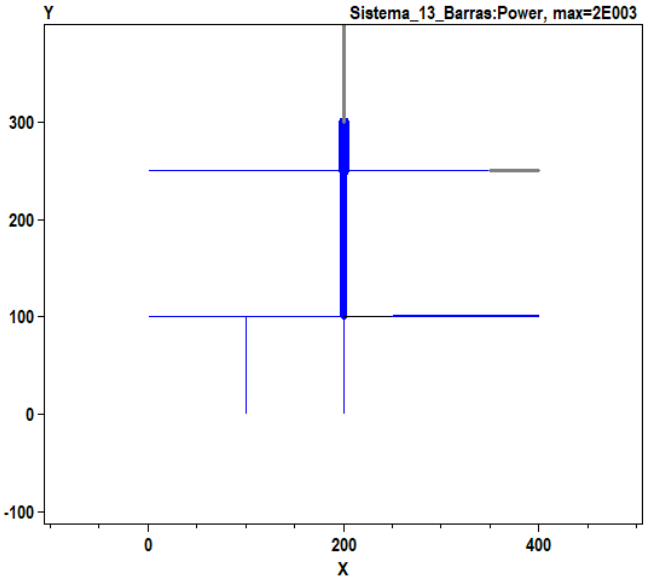

Figura 2. Sistema Teste IEEE de 13 Barras no OpenDSS.

No contexto do *software* OpenDSS, ao serem configurados com os dados extraídos da BDGD por meio da interface do QGIS, esses elementos proporcionam a realização de simulações detalhadas e análises precisas do sistema elétrico. O OpenDSS oferece a capacidade de analisar o fluxo de potência em diversos cenários, destacando-se a consideração da GD, especialmente proveniente de fontes fotovoltaicas e eólicas. Essa abordagem amplia o escopo de análise e contribui para uma compreensão mais completa do SDEE, fortalecendo o embasamento para o planejamento, operação e manutenção.

3. METODOLOGIA

Nesta seção, será detalhada a metodologia adotada para modelar um SDEE nacional utilizando o OpenDSS, com base nas informações extraídas da BDGD e integradas à interface geoespacial do QGIS. Essa abordagem permitirá uma representação precisa da infraestrutura elétrica, viabilizando a realização de análises para compreender o comportamento do sistema em uma variedade de cenários operacionais.

3.1 Procedimentos para Coletar Informações da BDGD

Para iniciar o processo de obtenção de dados da BDGD disponibilizada pela ANEEL, é necessário acessar o portal da ANEEL e fazer o *download* dos dados da concessionária de energia elétrica desejada. Esses dados englobam informações sobre o sistema elétrico, como linhas de transmissão, subestações e transformadores (ANEEL, 2024b).

Para modelagem completa do sistema elétrico, é imprescindível também realizar o *download* de um arquivo específico no portal da ANEEL, contendo informações detalhadas sobre a composição das cargas referentes as unidades consumidoras. Essas cargas podem ser classificadas em diferentes níveis de tensão, como alta, média ou baixa tensão, e são fundamentais para uma análise abrangente e precisa da rede de distribuição (ANEEL, 2024a).

3.2 Integração de Dados da BDGD no QGIS

Após o *download* dos dados da BDGD, o próximo passo é importá-los no QGIS. Para isso, utilize a opção "Adicionar Camada" no menu do QGIS e selecione o arquivo ".zip" da BDGD. Após a importação, os dados são exibidos no mapa do QGIS. Recomenda-se instalar o complemento HCMGIS, que adiciona funcionalidades, como a inclusão do Google Maps como camada base. Na Figura 3, é possível ver os dados da BDGD sobrepostos a imagens de satélite do Google Maps. Com os dados importados, podem-se realizar análises geoespaciais para entender a distribuição da infraestrutura elétrica e identificar áreas de interesse.

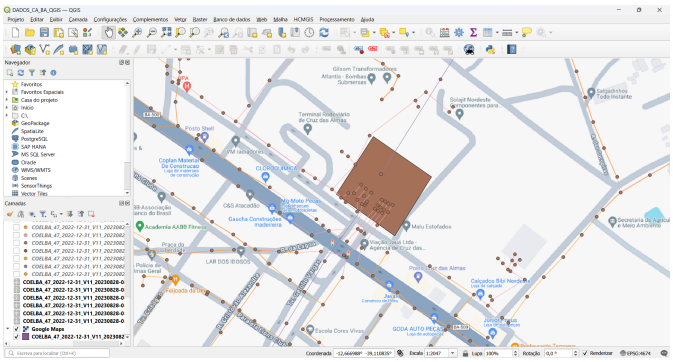

Figura 3. BDGD sobreposta ao Google Maps.

Na representação da Figura 3, os quadrados marrons representam as subestações, as linhas roxas indicam a rede de alta tensão (69 kV), as linhas rosas correspondem à rede de média tensão (13,8 kV), e os pontos marrons destacam o início ou final de um trecho na infraestrutura elétrica.

3.3 Análise de Dados da BDGD no QGIS

Para modelar o sistema elétrico com base nos dados da BDGD, é necessário integrar as informações dos SDEE ao *software* QGIS. Os parâmetros presentes no Manual de Instruções da BDGD, como CTAT, TTEN, CLAS_TENSÃO, POT_NOM, LIG, TEN_PRI, TEN_SEC, PER_FER, PER_TOTAL, entre outros, orientam a modelagem no *software* OpenDSS. A Figura 4 apresenta alguns desses parâmetros por meio do QGIS, proporcionando uma representação visual que auxilia na modelagem do sistema elétrico.

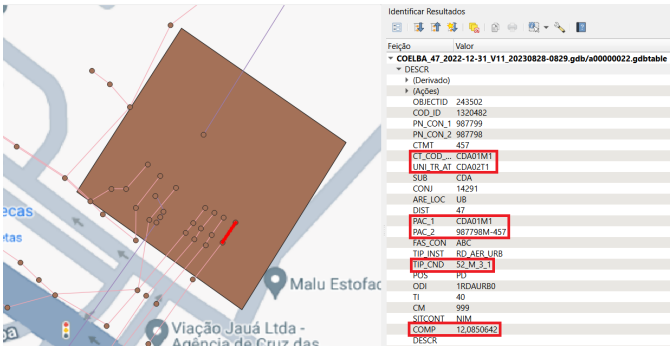

Figura 4. Parâmetros do Sistema Elétrico.

O processo de modelagem de uma rede elétrica tem início na subestação. Utilizando o QGIS (Figura 5), é possível acessar os dados dos equipamentos na tabela de atributos da "feição". No caso do transformador da subestação, o parâmetro CT_COD_OP identifica o código operacional do circuito no segmento da SDEE, enquanto os parâmetros TEN_PRI e TEN_SEC, que representam os códigos das tensões nominais do primário e secundário, respectivamente, são identificados pelo parâmetro UNI_TR_AT.

OBJECTID	COD_ID	DIST	POT_NOM	TEN_PRI	TEN_SEC	PER_FER	PER_TOT	DESCR	UNI_TR_AT
23	1221253	47	74	82	49	0,09	0,49	TRAFO 69/13,8 KV 10/12,5 MVA TRIF.	BRN02T1
365	1221252	47	74	82	49	0,09	0,49	TRAFO 69/13,8 KV 10/12,5 MVA TRIF.	CDA02T1
219	1220432	47	82	94	49	0,08	0,38	TRAFO 138/13,8 KV 20/26,6 MVA TRIF.	IPU03T1

Figura 5. Parâmetros da Subestação.

De acordo com o manual, o código 74 da POT_NOM corresponde a uma potência nominal de 10 MVA. Além disso, o código 82 no parâmetro TEN_PRI indica uma tensão primária de 69 kV, enquanto o código 49 no TEN_SEC representa uma tensão secundária de 13,8 kV (ANEEL, 2021a).

Em seguida, para modelar as linhas do SDEE, os parâmetros essenciais são obtidos a partir da tabela de atributos da linha, visualizada no QGIS, conforme mostrado na Figura 6. Destacam-se os códigos TIP_CND, que indicam o tipo de condutor, e o COMP, que representa o comprimento do segmento de rede em metros. Além desses, são modelados os parâmetros R1 e X1, que informam, respectivamente, a resistência e a reatância de sequência positiva (ohms/km), juntamente com o CNOM, que fornece a corrente nominal do condutor (A).

A modelagem das cargas que compõem a SDEE é realizada a partir das informações contidas no arquivo Excel da BDGD. Conforme apresentado na Figura 7, nesse conjunto de dados, podem ser destacados o PAC da carga, a

OBJECTID	COD_ID	DIST	R1	X1	CNOM	CMAX	GEOM_CAB
903	52_M_3_2	47	0,306	0,4716	340	340	5
838	52_M_3_1	47	0,306	0,4716	340	340	3
571	52_M_2_3	47	0,306	0,4716	340	340	8

Figura 6. Parâmetros da Linha de Energia Elétrica.

carga instalada da unidade consumidora (kW), o código CTMT, que identifica o circuito de tensão média, e o código UNI_TR_AT, que indica o transformador ao qual a unidade está conectada.

COD_ID	DIST	PAC	CTMT	UNI_TR_AT	SUB	BRR	CEP	CAR_INST	POINT_X	POINT_Y
7013994182	47	12433109M-504	504	CDA02T1	CDA	ITAPICURU	44.380-000	93,26	-3.911.456.926	-1.266.321.578
7048067748	47	12052689M-457	457	CDA02T1	CDA	PRQ REINALDO BR	44.380-000	618,2	-3.911.061.059	-1.266.633.722
70011204	47	10343505 7M-50	504	CDA02T1	CDA	RURAL-CRUZ DAS	44.380-000	250	-391.255.973	-1.265.680.146

Figura 7. Cargas do Sistema Elétrico.

É possível comparar o PAC de carga com o PAC de linha no Excel ou pelas coordenadas de carga no QGIS para garantir a correta integração no modelo do SDEE.

3.4 Modelagem do Sistema Elétrico no OpenDSS

A modelagem de um sistema elétrico no OpenDSS tem início por meio de uma barra de referência, que representa a subestação, e é representada por um equivalente de *Thevenin*. Esse elemento é modelado conforme os parâmetros apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Configurações da Subestação.

Parâmetro	Descrição
New circuit.Sistema_CA-BA	Criação da Subestação
bus1=GMVCDA	Localização da subestação
basekv=69	Tensão de base
phases=3	Número de fases
pu=1.000	Unidade de potência (pu)
Angle=0	Compensação de fase
MVASC3=20000	Potência de CC trifásico
MVASC1=20000	Potência de CC monofásico

As especificações de um transformador no OpenDSS são definidas conforme apresentado na Tabela 7. Essa modelagem abrange informações específicas sobre as configurações de conexão, valores de tensão e capacidades do transformador, sendo fundamentais para a representação do componente na subestação.

Tabela 7. Configuração do Transformador.

Parâmetro	Descrição
New Transformer.CDA02T1	Criação do transformador
phases=3	Número de fases
Windings=2	Número de enrolamentos
XHL=(8 1000/)	Reatância indutiva
wdg=1	Enrolamento 1
bus=B1	Localização do enrolamento 1
conn=delta	Conexão do enrolamento 1 (D)
kV=69	Tensão no enrolamento 1
kVA=10000	Potência no enrolamento 1
%r=(.49 1000/)	Perdas no enrolamento 1
wdg=2	Enrolamento 2
bus=B2	Localização do enrolamento 2
conn=wye	Conexão do enrolamento 2 (Y)
kV=13.8	Tensão no enrolamento 2
kVA=10000	Potência no enrolamento 2
%r=(.49 1000/)	Perdas no enrolamento 2

As linhas de distribuição de energia elétrica são modeladas no OpenDSS utilizando o modelo de linha curta, cuja implementação é exemplificada na Tabela 8.

Tabela 8. Configuração da Linha.

Parâmetro	Descrição
New Line.Linha1_Trecho01	Criação da Linha
Phases=3	Número de fases
Bus1=CDA01M1	Primeiro barramento de conexão
Bus2=Trecho_01	Segundo barramento de conexão
LineCode=52_M_3_1	Parâmetros elétricos
Length=0.10084	Comprimento da linha
units=km	Unidade de comprimento

Na Tabela 9, são apresentadas as especificações do elemento *linecode*, que define o modelo das linhas do SDEE.

Tabela 9. Configuração da LineCode.

Parâmetro	Descrição
New linecode.52_M_3_1	Criação da linha
phases=3	Número de fases da linha
BaseFreq=60	Frequência base do sistema em Hz
R1 = 0.306	Resistência de sequência positiva
X1 = 0.433	Reatância de sequência positiva
units=km	Unidade de comprimento

Na outra extremidade da SDEE situam-se as cargas. Conforme exemplificado na Tabela 10, a modelagem das cargas no OpenDSS inclui informações como o barramento de conexão e o fator de potência da carga.

Tabela 10. Configuração da Carga.

Parâmetro	Descrição
New Load.Carga_1	Criação da carga 1
Bus1=Barra_01	Carga conectada ao barramento 01
Phases=3	Número de fases da carga
Conn=Delta	Conexão da carga em Delta
Model=1	Modelo de carga 1
kV=13.8	Tensão nominal da carga
kW=618.2	Potência ativa da carga
pf=0.92	Fator de potência da carga

4. RESULTADOS

A metodologia foi aplicada ao sistema elétrico da cidade de Cruz das Almas - BA (CDA), que inclui uma subestação equipada com dois transformadores de 10 MVA cada, operando a uma tensão de 69 kV/13,8 kV. Este sistema é abastecido por quatro alimentadores conectados ao transformador 1 e três alimentadores ao transformador 2.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram adotadas as seguintes premissas:

- Modelagem de dois alimentadores do transformador 1 (CDA01M1 e CDA01M2);
- Modelagem de cargas conectadas na média tensão;
- Consideração da potência de cada carga como a potência instalada;
- Utilização de um fator de potência de 0,92 para todas as cargas.

4.1 Características elétricas da rede de CDA

O sistema elétrico de CDA analisado possui 10 tipos de condutores, os quais são definidos pelo comando *linecode* do OpenDSS. As características desses condutores são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Configuração dos condutores.

Código	R1 (Ohm/km)	X1 (Ohm/km)	Imáx (A)
12_M_3_1	1,308	0,499	130
43_M_3_1	0,991	0,321	149
45_M_3_1	0,975	0,523	180
46_M_3_1	1,551	0,520	140
47_M_3_1	0,613	0,518	230
52_M_3_1	0,306	0,433	340
61_M_3_1	0,441	0,164	186
61_M_3_2	0,306	0,433	186
72_M_3_1	0,188	0,259	438
73_M_3_1	0,506	0,297	229

As cargas de média tensão, disponibilizadas no arquivo adicional da BDGD, estão distribuídas ao longo dos alimentadores. Conforme mencionado nas seções anteriores, a localização das cargas foi identificada por meio dos PAC. Na Tabela 12, apresentam-se as informações das cargas de média tensão obtidas pela BDGD.

Tabela 12. Configuração das cargas.

ID da carga	Carga inst. (kW)	Alimentador	PAC
Barra 01	618,20	CDA01M1	12052689
Barra 02	250,00	CDA01M1	5318622
Barra 03	97,72	CDA01M1	5319884
Barra 04	109,30	CDA01M1	12430858
Barra 05	450,00	CDA01M1	5319838
Barra 06	71,00	CDA01M1	12626995
Barra 07	70,00	CDA01M1	13150882
Barra 08	75,00	CDA01M1	5318667
Barra 09	106,00	CDA01M2	5319150
Barra 10	71,58	CDA01M2	5318926
Barra 11	97,96	CDA01M2	12332332
Barra 12	63,00	CDA01M2	5318687
Barra 13	13,090	CDA01M2	10250221
Barra 14	69,00	CDA01M2	104381579
Barra 15	75,00	CDA01M2	10212338
Barra 16	430,00	CDA01M2	104335275
Barra 17	95,80	CDA01M2	12762093

4.2 Fluxo de potência do sistema de CDA

Na Tabela 13 são apresentados os resultados do cálculo de fluxo de potência realizado pelo OPENDSS. Observa-se que na Tabela 13 que os níveis de tensão encontram-se dentro dos parâmetros aceitáveis para a operação das cargas, conforme os padrões de qualidade de energia estabelecidos em que tensão a ser contratada poderá situar-se entre 95% e 105% da tensão nominal do sistema no ponto de conexão. Essa conformidade é detalhada no Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021c).

O fluxo de potência total leva em consideração tanto a carga total analisada quanto as perdas inerentes no processo de distribuição de energia elétrica. Na Tabela 14, são apresentados os valores encontrados para o fluxo de potência no sistema analisado.

Na última linha da Tabela 14, são apresentados os totais das cargas e perdas, com as perdas identificadas em 0,8% no sistema CDA. Os resultados foram obtidos por simulação no OpenDSS, utilizando dados da BDGD. Embora as cargas tenham sido simuladas com valores constantes, a BDGD também oferece curvas de carga divididas em dias úteis, sábados e domingos, permitindo aproximar os cálculos do OpenDSS aos do módulo 7 do PRODIST (ANEEL, 2021b).

Tabela 13. Níveis de tensão nas barras.

ID da carga	Tensão de Linha (kV)	Tensão de linha (pu)
Barra 01	13,770	0,997
Barra 02	13,690	0,992
Barra 03	13,730	0,995
Barra 04	13,678	0,991
Barra 05	13,612	0,986
Barra 06	13,645	0,988
Barra 07	13,679	0,991
Barra 08	13,687	0,991
Barra 09	13,677	0,991
Barra 10	13,645	0,988
Barra 11	13,645	0,988
Barra 12	13,643	0,988
Barra 13	13,642	0,988
Barra 14	13,641	0,988
Barra 15	13,644	0,988
Barra 16	13,643	0,988
Barra 17	13,657	0,989

Tabela 14. Dados de potência e perdas da rede.

Potência total das cargas (kW)	2762,65
Fluxo de potência (kW)	2784,90
Perdas (kW)	22,25

4.3 Análise gráfica da rede de CDA

A análise gráfica das redes elétricas no OpenDSS fornece uma representação da disposição dos componentes e do fluxo de energia no sistema CDA. As coordenadas dos componentes são obtidas por meio do PAC e das informações geográficas disponíveis, que são incorporadas em um arquivo ".csv" e carregadas no OpenDSS utilizando o comando "BusCoords". A visualização gráfica, realizada através do comando "plot circuit", permite a análise da distribuição espacial dos componentes e do fluxo de energia na SDEE, conforme apresentado na Figura 8.

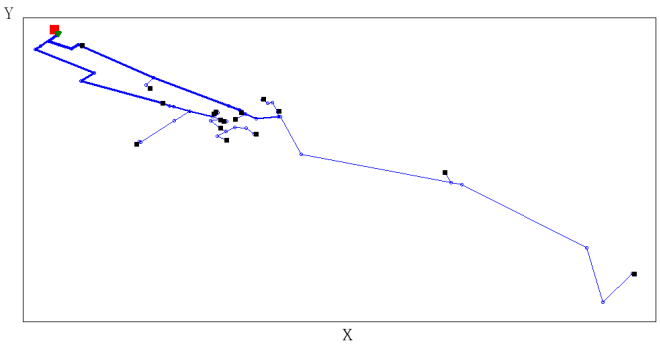

Figura 8. Sistema de CDA visto no OpenDSS.

Na Figura 8, o quadrado vermelho representa a subestação, enquanto o triângulo verde simboliza o transformador. As linhas azuis indicam os trechos, e os quadrados pretos representam as cargas (barras) do sistema. Para comparação com os dados geográficos no QGIS, a representação da rede demonstrada, juntamente com os dados no QGIS, é apresentada na Figura 9.

Observando a metodologia aplicada, foi possível modelar o sistema CDA no OpenDSS (Figura 8) de forma satisfatória a apresentar semelhanças com o sistema CDA importado do BDGD no *software* QGIS (Figura 9). Essa aplicação

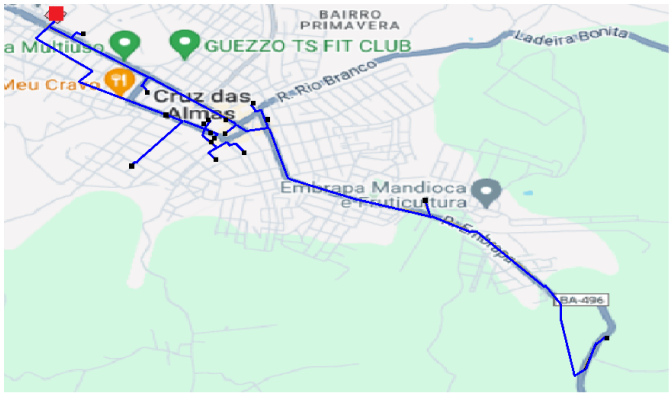

Figura 9. Sistema de CDA visto pelo QGIS.

inicial pode ser utilizada para os próximos estudos de fluxo de potência e planejamento da rede elétrica.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para a modelagem de Redes de Distribuição de Energia Elétrica (RDEE), utilizando os dados da Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD) em conjunto com o OpenDSS e o QGIS. Os resultados obtidos no estudo de caso da rede elétrica de média tensão da cidade de Cruz das Almas - BA, demonstraram a eficácia dessa abordagem, com perdas nas linhas de distribuição de energia elétrica de apenas 0,8% e níveis de tensão adequados para a operação das cargas.

A implementação da metodologia em outros sistemas contidos na BDGD foi evidenciada, tornando-a uma ferramenta valiosa para concessionárias de energia elétrica, pesquisadores e consultores. Adicionalmente, a metodologia permite a análise dinâmica do sistema, considerando a variação da carga ao longo do dia e a inclusão da geração distribuída. Essa análise proporciona uma compreensão mais completa do comportamento da rede em diferentes cenários operacionais, contribuindo para o planejamento eficiente e a tomada de decisões estratégicas.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia proposta neste trabalho oferece uma abordagem robusta e versátil para a modelagem e análise de redes de distribuição de energia elétrica, com amplas possibilidades de aplicação e benefícios significativos para o setor elétrico.

REFERÊNCIAS

ANEEL (2014). Nota Técnica n° 0057/2014-SRD/ANEEL. Disponível em: `http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0057_srd.pdf`.

ANEEL (2021a). PRODIST MÓDULO 10 - SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA REGULATÓRIO. Disponível em: `https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_9.pdf`.

ANEEL (2021b). PRODIST MÓDULO 7 - CÁLCULO DE PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO. Disponível em: `https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_6.pdf`.

ANEEL (2021c). PRODIST MÓDULO 8 - QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: `https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf`.

ANEEL (2022). Base de Dados Geográfica da Distribuidora - BDGD - Dados Abertos. Disponível em: `https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/base-de-dados-geografica-da-distribuidora-bdgd`.

ANEEL (2023). Distribuição. Disponível em: `https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/manuais-modelos-e-instrucoes/distribuicao`.

ANEEL (2024a). BDGD. Disponível em: `https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/base-de-dados-geografica-da-distribuidora-bdgd/resource/f6671cba-f269-42ef-8eb3-62cb3bfa0b98`.

ANEEL (2024b). DADOS. Disponível em: `https://dadosabertos-aneel.opendata.arcgis.com/search?collection=dataset&q=coelba`.

Bottazzi, F.G. (2022). *Avaliação do Impacto da Energia Renovável no Sistema Elétrico Nacional*. Ph.D. thesis, Instituto Politecnico do Porto (Portugal).

Clemente, A. et al. (2017). Electric distribution system planning using open source geographic information system (gis) tools: A review. *IEEE Access*, 5, 18449–18466.

Hoffmann, G.P., Borelli, R.M., and Nanni, A.S. (2018). O uso de geotecnologias livres: Qgis e epicollect no levantamento de dados em geociências. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*.

Holzbach, M., Ferreira, F.T.S., Carvalho, C.S.C., Resende, S.A., and Franco, F.J. (2022). Análise da inserção de geração distribuída fotovoltaica em um modelo de sistema elétrico de distribuição real utilizando o software opendss. In *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*.

Jiang, L. et al. (2020). Urban electric power infrastructure planning supported by geographic information system-based suitability analysis. *Energy*, 191, 116513.

Nascimento, J.L., Freitas, G.A., Sobrinho, S.C., Almada, B.J., and Oliveira, M.H. (2020). Análise do impacto da inserção de geração distribuída fotovoltaica nos níveis de tensão de alimentador de distribuição real utilizando opendss. In *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*.

OpenDSS (2024). OpenDSS. Disponível em: `https://sourceforge.net/projects/electricdss/`.

QGIS (2024). QGIS. Welcome to the QGIS project! Disponível em: `https://qgis.org/en/site/`.

Santos Junior, D.D.d. (2022). *Coordenação da proteção de um alimentador em Curitiba-PR usando OpenDSS, BDGD e QGIS*. B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Souza, A.G.d. (2021). Coordenação da proteção de um sistema de distribuição de energia elétrica em uberlândia-mg usando bdgd, qgis e opendss.

Souza, J.P.A., Ferreira, J.K., and Campos, G.E.M. (2020). Uso do opendss em aplicações reais para concessionárias de energia. In *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*.

Thurner, L., Scheidler, A., Schäfer, F., Menke, J.H., Dollichon, J., Meier, F., Meinecke, S., and Braun, M. (2018). pandapower—an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6510–6521.