



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EDSON LUIZ SANTANA DOS SANTOS

**Utilização do *OpenDSS* para a análise de fluxo de carga na malha de distribuição da  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**

Recife  
2024

EDSON LUIZ SANTANA DOS SANTOS

**Utilização do *OpenDSS* para a análise de fluxo de carga na malha de distribuição da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Me. Alex Ferreira Falcão Moreira

Recife  
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Edson Luiz Santana dos.

Utilização do OpenDSS para a análise de fluxo de carga na malha de distribuição da Universidade Federal de Pernambuco ? UFPE / Edson Luiz Santana dos Santos. - Recife, 2024.

76 : il., tab.

Orientador(a): Alex Ferreira Falcão Moreira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. OpenDSS. 2. Fluxo de Carga. 3. UFPE. 4. Rede de distribuição. 5. Python.

I. Moreira, Alex Ferreira Falcão. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Edson Luiz Santana dos Santos

**Utilização do *OpenDSS* para a análise de fluxo de carga na malha de distribuição da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 20/03/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. Alex Ferreira Falcão Moreira  
Universidade Federal de Pernambuco

---

MSc. Ericles Mauricio Barbosa  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. José Filho da Costa Castro  
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado ao imenso apoio advindo de Deus, familiares, professores e amigos que me propiciaram a minha base e incentivo para o prosseguimento da conclusão da graduação. A todos eu serei eternamente grato.

## **AGRADECIMENTOS**

Venho a iniciar esta seção agradecendo ao meu Deus tão perfeito por me guiar durante esses anos de desafios em uma graduação muito difícil como em qualquer área de engenharia, especialmente envolvendo os rumos da eletricidade.

Agradeço aos meus queridos pais José Edson dos Santos e Joseane Joaquim de Santana por sempre desde o princípio do meu aprendizado me estimularem a prosseguir, me cedendo a base de apoio e recursos necessários para a aquisição de materiais como uma calculadora gráfica e demais equipamentos escolares, também entendendo a compreensão sobre a falta de disponibilidade de viagens em família, etc.

Agradeço o companheirismo e incentivo constante advindos dos meus queridos irmãos Davi Gabriel Santana dos Santos e Pedro Otávio Santana dos Santos.

Agradeço aos meus amigos e colegas discentes que me acompanharam durante essa jornada, desde a área básica até a formação dentro do Centro de Tecnologias e Geociências, especialmente à minha prima Twany Mirele Correia, graduada no curso de Engenharia Civil no semestre anterior, a ela exprimo a minha gratidão pelo seu apoio fundamental durante toda a minha trajetória.

Agradeço à Superintendência de Infraestrutura (SINFRA) da Universidade Federal de Pernambuco por disponibilizarem o mapeamento de todos os trechos de condutores somadas as suas especificações de impedâncias características presentes em uma planta baixa em formato DWG.

Agradeço a todos os docentes pelo encaminhamento de didáticas esplendidas ao meu ensino, mesmo em disciplinas tão desafiadoras como Fluxo de Carga e Estabilidade (importantíssima para o desenvolvimento deste trabalho) com o professor Augusto C. C. de Oliveira, ou as disciplinas de Circuitos Elétricos (I e II) com o professor Luiz Antônio Magnata da Fonte, ou em Engenharia de Controle II com o professor Fabrício Bradaschia nas disciplinas de Engenharia de Controle II e em Laboratório de Circuitos na qual eu tive a honra de poder ser monitor bolsista. Mas acima de tudo eu sou grato ao meu professor orientador Alex Ferreira Falcão Moreira, conhecido em um momento de dificuldade vivenciado na pandemia da Covid 19 em um período de aulas remotas, mais especificamente na disciplina de

Medidas Elétricas. Porém, apesar dessa pequena distância nunca deixamos de estar próximos desde quando ele aceitou ser o meu orientador de estágio e por fim também o orientador deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de trabalho conhecidos no meu período de estágio na Neoenergia Pernambuco, período com vínculos fundamentais para que pudessem me propiciar bases, conexões e comunicações para o desenvolvimento deste trabalho, envolvendo o Sistema Elétrico de Potência, direcionado ao mundo da distribuição de energia.

Agradeço ao apoio fundamental e incondicional propiciado pela minha namorada Noely Glenda Correia de Moura, graduanda no curso de Engenharia de Controle e Automação, ingressa durante a fase da área básica de ensino junto a mim. Ela foi importantíssima para que eu tivesse muito mais motivação na conclusão desta graduação.

Espero que a comunidade acadêmica possa aproveitar deste estudo para o desenvolvimento de futuras aplicações de melhoria e cuidados com a nossa estrutura elétrica do campus, assim como a utilização de todo esse conhecimento para o aprendizado e aprimoramento de conteúdo útil na formação de um engenheiro eletricista empenhado no conhecimento de redes de distribuição.

Epígrafe

No meio da dificuldade, encontra-se a oportunidade  
(Albert Einstein)

## RESUMO

Este trabalho visa proporcionar à comunidade acadêmica um estudo de fluxo de carga na rede de distribuição da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Campus Recife, utilizando o *software OpenDSS* ao basear-se em parâmetros de curto-circuito informados através de solicitações à concessionária de energia local nos barramentos de entrega de energia ao Campus, bem como também utilizando componentes geográficos da Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD), geridos e fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A partir do logro na obtenção dos dados necessários, prossegue-se a avaliação do estudo de forma progressiva, desde à síntese do código no *OpenDSS* constando os parâmetros elétricos presentes na infraestrutura a ser estudada, passando para uma avaliação mais completa ao utilizar comandos mais assertivos com comandos em *Python* os quais envolvem a inserção de um elemento de registro gráfico de informações de qualidade energética, propiciando com que não seja necessária a abertura e modificação dos documentos de texto legíveis ao *software* principal, dependendo unicamente que o usuário informe sobre a necessidade de inclusão dos elementos de Geração Distribuída (GD), o fator de potência de interesse para as cargas da rede, e por fim, em qual trecho de linha estará o elemento de medição. Neste estudo, o elemento de medição tem a função de propiciar o registro diário sobre o sentido do fluxo de carga envolvendo a geração e o consumo, os valores do módulo das correntes em comparação com os valores nominais suportados pelos condutores entregues no sentido do fluxo, e principalmente os valores de tensão normalizados Por Unidade (PU) durante o período. Ao final da abordagem a respeito do modelo da malha de distribuição devidamente fundamentada, possibilita-se a sugestão da aplicação de estratégias envolvendo duas vertentes visando a correção e ajuste a níveis apropriados de qualidade para os afundamentos de tensão visualizados em curvas diárias desta grandeza para os pontos de inserção do elemento de medição, trazendo sugestões apropriadas para a comunidade acadêmica acerca de melhorias qualitativas na rede de distribuição da UFPE.

**Palavras-chave:** *OpenDSS*; Fluxo de Carga; UFPE; Rede de distribuição; *Python*.

## ABSTRACT

This work aims to provide the academic community with a load flow study on the distribution network of the Federal University of Pernambuco (UFPE), Recife Campus, using the OpenDSS software. The study relies on short-circuit parameters obtained through requests to the local power utility at the energy delivery buses to the campus. Additionally, it utilizes geographic components from the Geographic Database of the Distributor (BDGD in brazilian portuguese), managed and provided by the National Electric Energy Agency (ANEEL in brazilian portuguese).

After obtaining the necessary data, the study progresses from synthesizing the code in OpenDSS, specifying the electrical parameters in the infrastructure to be studied. It then moves to a more comprehensive evaluation, using Python commands for more precise actions, including the insertion of a graphical recording element for power quality information. This approach eliminates the need to open and modify text documents readable by the main software. The user only needs to provide information regarding the inclusion of Distributed Generation elements, the power factor of interest for the network loads, and the specific line section for the measurement element. In this study, the measurement element aims to record daily data on the direction of load flow between generation and consumption, the module values of currents compared to the nominal values supported by the conductors in the flow direction, and primarily the normalized Per Unit (PU) voltage values during the period. At the end of the discussion on the well-founded distribution grid model, the study suggests the application of strategies involving two aspects to correct and adjust to appropriate international quality levels for voltage sags observed in daily curves for the measurement insertion points. It brings suitable suggestions to the academic community for qualitative improvements in the UFPE distribution network.

Keywords: OpenDSS; Load Flow; UFPE; Distribution Network; Python.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeção da capacidade instalada de GD (em GW) Por segmento. ....	15
Figura 2 – Modelo Pi Equivalente para linhas de transmissão. ....	19
Figura 3 – Modelo Pi Equivalente para linhas de transmissão curtas. ....	19
Figura 4 – Fluxo de Carga Convencional. ....	20
Figura 5 – Visão do painel de codificação do <i>OpenDSS</i> . ....	23
Figura 6 – Estruturas de operação do <i>OpenDSS</i> . ....	23
Figura 7 – Representação do modelo <i>bus</i> . ....	24
Figura 8 – Representação do modelo <i>Terminal</i> . ....	25
Figura 9 – Representação do elemento PD. ....	25
Figura 10 – Representação do elemento PC. ....	25
Figura 11- Modificação do condicionamento para o fluxo de potência no algoritmo. ....	34
Figura 12 – Abertura do <i>prompt</i> visando a instalação da <i>py-dss-interface</i> . ....	35
Figura 13 – Instalação da biblioteca através do <i>prompt</i> de comando do <i>Windows</i> . ...	35
Figura 14 – Tutorial 1 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS ....	39
Figura 15 – Tutorial 2 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS ....	39
Figura 16 – Tutorial 3 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS ....	40
Figura 17 – Tutorial 4 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS. ....	40
Figura 18 – Representação das camadas da BDGD. ....	41
Figura 19 – Tutorial para a filtragem das camadas no QGIS. ....	42
Figura 20 – Painel de filtro para a camada das subestações com o código da SUB Caxangá. ....	42
Figura 21 – Resultado dos filtros para as entidades em observação. ....	43
Figura 22 – Dados de Curto-Circuito para o barramento B055389, poste de entrada de energia através do alimentador CAX-01P4. ....	45
Figura 23 – Dados de Curto-Circuito para o barramento B057360, poste de entrada de energia através do alimentador CAX-01P8 ....	45
Figura 24 – Vista aérea da usina fotovoltaica do CTG. ....	46
Figura 25 – Registro de dados de GD nas imediações do CTG. ....	47
Figura 26 – Máximas potências de geração registradas ....	48
Figura 27– Máximas potências de geração registradas ....	49
Figura 28 – Planta da rede de distribuição da UFPE. ....	50

Figura 29 – Arquivos legíveis ao <i>OpenDSS</i> no diretório REDEUFPE. ....	52
Figura 30 – Fluxograma pretendido para o <i>script</i> . ....	53
Figura 31 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P8 sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	54
Figura 32 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P4 sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	55
Figura 33 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CTG sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	56
Figura 34 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CCSA sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	56
Figura 35 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P8 com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	58
Figura 36 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P4 com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	58
Figura 37 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CTG com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	59
Figura 38 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CCSA com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92. ....	59
Figura 39 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P8 com a inclusão da GD, com a inclusão de um banco de capacitores de 2000 kvar's e FP = 0,92. ....	61
Figura 40– Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P4 com a inclusão da GD, com a inclusão de um banco de capacitores de 3800 kvar's e FP = 0,92. ....	61

Figura 41 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CTG com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = - 0,993.....	62
Figura 42– Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CCSA com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 1,00.....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Elementos do <i>OpenDSS</i> utilizados nos estudo .....	24
Quadro 2 – Entidades Geográficas abordadas no estudo. ....	37
Quadro 3 – Entidade Não Geográfica abordada no estudo. ....	38
Quadro 4 – Entidade Não Geográfica abordada no estudo .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas de fornecimento de energia do campus. ....	44
Tabela 2 – Quantidade de elementos a serem declarados no <i>OpenDSS</i> .....	50
Tabela 3 – Impedâncias características dos condutores em $\Omega/\text{km}$ , declarados em <i>Linecodes</i> .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BDGD	Base de Dados Geográfica da Distribuidora
CCSA	Centro de Ciências Sociais Aplicada
CTG	Centro de Tecnologias e Geociências
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FP	Fator de Potência
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída
GW	Giga-Watts
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LAM	Laboratório de Armazenamento e Mobilidade
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PC	<i>Power Conversion</i>
PD	<i>Power Delivery</i>
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PU	Por Unidade
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SO	Sistema Operacional
SQL	<i>Structured Query Language</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	Geral .....	16
1.1.2	Específicos .....	16
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	MODELOS ITERATIVOS DE ANÁLISE .....	18
2.2	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS PARÂMETROS ELÉTRICOS .....	19
2.3	INTRODUÇÃO AO <i>OPENDSS</i> .....	22
2.3.1	Linecode .....	26
2.3.2	Vsource .....	27
2.3.3	Capacitor .....	28
2.3.4	Lines .....	28
2.3.5	Transformer .....	29
2.3.6	Load .....	29
2.3.7	Energymeter .....	30
2.3.8	Circuit .....	30
2.3.9	Loadshape .....	31
2.3.10	Generator .....	32
2.3.11	O Algoritmo das Correntes de Compensação .....	32
2.3.12	Passos para a resolução do algoritmo: .....	34
2.3.13	A escolha do Python como mecanismo de controle do OpenDSS .....	34
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO TRABALHO .....</b>	<b>37</b>
3.1	ACESSO À BDGD .....	37
3.2	ELEMENTOS QUE COMPÕE A GD NO ESTUDO .....	46
3.3	DEFINIÇÃO DOS BARRAMENTOS E ELEMENTOS UTILIZADOS A PARTIR DA PLANTA BAIXA DA UFPE .....	49
3.4	DECLARAÇÃO DOS DADOS DE SIMULAÇÃO NOS DOCUMENTOS LEGÍVEIS AO <i>OPENDSS</i> .....	52
3.5	CONSTRUÇÃO DO ARQUIVO DE SIMULAÇÃO NO <i>PYTHON</i> .....	53
3.6	RESULTADOS GRÁFICOS SEM A INCLUSÃO DE GD E SEM COMPENSAÇÃO CAPACITIVA .....	54
3.7	RESULTADOS GRÁFICOS COM A INCLUSÃO DE GD E SEM COMPENSAÇÃO CAPACITIVA .....	57
3.8	COMPENSAÇÕES PASSIVAS VISANDO MITIGAR OS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO .....	60
3.8.1	Bancos de capacitores acoplados à jusante dos medidores .....	61
3.8.2	Ajuste automático de FP nos terminais das subestações .....	62
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>64</b>

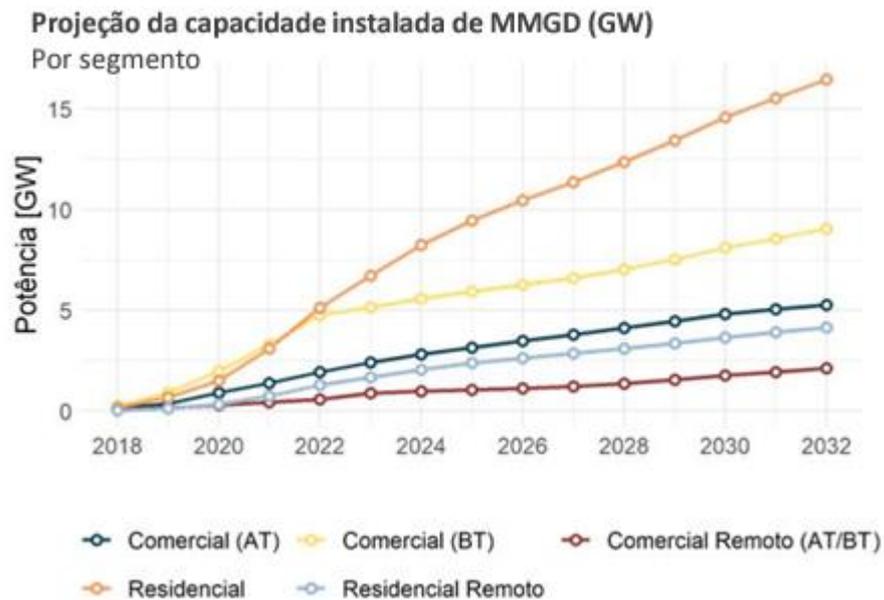
## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica ao longo dos anos torna-se cada vez mais indispensável e fundamental para o desenvolvimento e bem-estar da sociedade global. Sabendo disto, apesar da complexidade do arranjo de ligação envolvendo os condutores e equipamentos elétricos, os profissionais responsáveis pela operação, manutenção e estabilidade do sistema devem proporcionar e dispor de altos padrões de confiança envolvendo os critérios de fornecimento regulados pelos órgãos nacionais envolvidos, como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [1].

Um profissional da área de engenharia elétrica passa em vários momentos de formação se aperfeiçoando em estudos e avaliações de cenários voltados a arranjos e simplificações do Sistema Elétrico de Potência (SEP), geralmente voltados aos cenários de geração e transmissão de energia, levando em conta as suas peculiaridades envolvendo as construções de modelos para os estudos destes sistemas de grandes potências. Porém, é inegável que os envolvidos neste cenário precisam direcionar uma boa parcela do esforço no aperfeiçoamento de estudos e compreensão dos segmentos do SEP voltados à distribuição, afinal de contas, novos produtos eletrodomésticos ou eletrônicos (e conseqüentemente as suas cargas) são apresentados aos consumidores, ocorrendo necessidades de expansão das redes são estudadas pela concessionária de energia local. Por fim, percebe-se de caráter mais intenso quanto às solicitações de geração distribuída (GD), potencializando os cenários de estudo de manutenção, expansão e operação das diversas estruturas presentes em território nacional.

Para ter-se uma ideia desta importância, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), divulgou no documento Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) de 2032 voltados à GD e baterias, informando que até o referido ano de horizonte da pesquisa, apenas a nível residencial espera-se ultrapassar os 15 Giga-Watts (GW) de geração, superando os dados de geração a plena carga até mesmo das usinas de Itaipú e Belo Monte as quais possuem de acordo com as transparências de seus sites oficiais capacidades instaladas de 14 GW [2] e 11,2 GW [3] respectivamente. A projeção do aumento da capacidade instalada de GD pode ser vista conforme a Figura 1 logo a seguir.

Figura 1 - Projeção da capacidade instalada de GD (em GW) Por segmento.



Fonte: Retirado de [4].

Neste trabalho visa-se proporcionar maior assertividade e confiança na visualização dos resultados de fluxo de potência para as redes de distribuição de energia, atendendo tanto profissionais quanto acadêmicos ligados ao estudo da eletricidade, especificamente buscando auxiliar estudantes, professores e pesquisadores da área de engenharia elétrica, principalmente aqueles ligados à UFPE, propiciando uma compreensão aprofundada do software *OpenDSS*.

O trabalho inclui a modelagem da malha simplificada de distribuição primária do campus universitário a fim de obter uma base para estudos futuros e mais detalhados sobre a infraestrutura elétrica local.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Desenvolver a estrutura e os códigos legíveis destinados à análise de estudos elétricos na malha de distribuição do campus da UFPE, partindo desde a concepção da sintaxe respectiva ao funcionamento do *OpenDSS* como os comandos complementares e auxiliares em *Python* a fim de extrair os resultados mais apropriados, visando fornecer à comunidade acadêmica (especialmente aos vinculados à UFPE) um produto para utilização apropriada podendo ser utilizado em estudos na rede de distribuição universitária.

### 1.1.2 Específicos

- a) Descrever os conceitos teóricos sobre as redes de distribuição em utilização no Brasil;
- b) Explanar acerca de conceitos teóricos de fluxo de potência e aplicação prática para o estudo deste trabalho;
- c) Explanar sobre os conceitos e a arquitetura do *OpenDSS* a ser utilizada neste estudo, em conformidade com comandos de utilização em *Python*;
- d) Apresentar resultados referentes à qualidade dos sinais presentes em entradas chaves quanto aos alimentadores de energia;
- e) Propor sugestões de continuidades de estudos a partir do conteúdo desenvolvido, assim como possíveis melhorias nas sintaxes integradas.

## 1.2 Organização do Trabalho

Este documento fora construído em quatro capítulos. O primeiro capítulo anteriormente visto, consta a introdução a qual contextualiza os objetivos a serem alcançados com o estudo proposto.

O segundo capítulo aborda o arcabouço teórico a respeito dos termos técnicos, legais (legislação brasileira), acadêmicos e científicos. O objetivo é embasar a

fundamentação apropriada para direcionar o leitor sobre a justificativa da utilização do OpenDSS como ferramenta adequada para a modelagem da malha primária de distribuição do campus universitário. Essa fundamentação busca obter bons dados provenientes de um fluxo de potência iterável e convergente, a fim de indicar a qualidade da rede de distribuição.

O terceiro capítulo traz o desenvolvimento e os resultados adquiridos em forma de figuras registradas em conformidade com os comentários dissertados para enfim informar no último capítulo, isto é, o quarto capítulo: As conclusões e propostas de continuidades futuras para os interessados em refinar e aprofundar o estudo iniciado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em [5] ressalta-se a importância dos estudos de fluxo de potência no que se refere ao planejamento e futuras aplicações em projetos envolvendo a expansão dos sistemas de potência, assim como também a procura da melhor condição de operação dos sistemas já construídos. Procura-se encontrar a magnitude e o ângulo de fase da tensão entre as barras ou pontos de conexões de elementos da rede, assim como os valores de potência ativa e reativa atravessando (ou fluindo) em cada trecho de linha. A norma IEEE Std 3002.2 de 2018 [6] declara que a análise de fluxo de carga inclui fluxo de potência em estado estacionário e análise de tensão, juntamente com considerações para cálculos de fluxo de potência ideal. Atualmente, a introdução da Geração Distribuída (GD) altera o conceito convencional de fluxo radial. Isso acontece quando a geração de energia ocorre próxima às cargas, em oposição à configuração tradicional de geradores síncronos conectados às barras. Essa mudança tem impactos na avaliação dos sinais de tensão [7]. É a partir dessa necessidade de avaliação da qualidade do fornecimento de energia que este trabalho foi concebido.

### 2.1 Modelos Iterativos de Análise

A fim de realizar a análise de fluxo de potência, utiliza-se modelos numéricos chamados de métodos iterativos computacionais, tendo como base fundamental a busca por raízes de um sistema de equações não lineares, como por exemplo os métodos de Newton, Newton-Raphson e o Gauss-Seidel [5] os quais são comumente utilizados para essas avaliações. Ora, seja qual for o mecanismo a ser utilizado, a modelagem matemática utilizará a equação nodal de uma rede avaliada possuindo “n” nós:

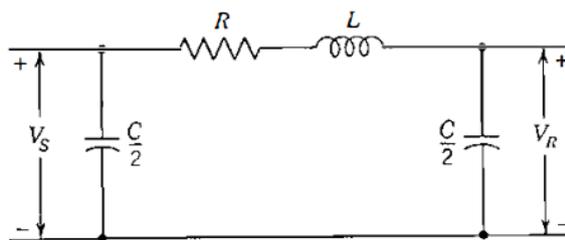
$$[Y_n] * [V_n] = [I_n] \quad (2.1)$$

Onde:  $[Y_n]$  refere-se à matriz de admitância nodal do sistema, já  $[V_n]$  trata-se da matriz referente ao vetor de tensões nodais do sistema enquanto  $[I_n]$  aborda o vetor das correntes injetadas nos respectivos nós [8].

## 2.2 Conceitos básicos sobre os parâmetros elétricos

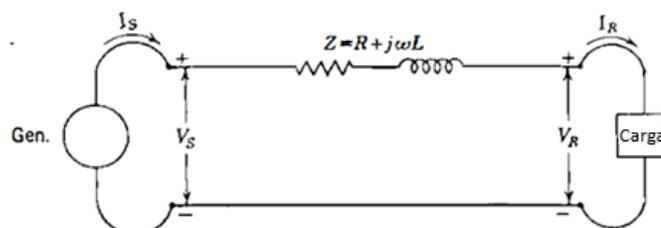
Normalmente, linhas de transmissão são modeladas fundamentalmente utilizando o modelo Pi Equivalente, e em alguns casos, a depender da extensão do comprimento dos condutores, realiza-se uma simplificação para o modelo Pi Equivalente de tamanho curto, isto é, linhas com dimensões inferiores a 80 km comprimento, desconsiderados os valores de capacitâncias elétricas [5] conforme as Figuras 2 e 3. Por mais que o mecanismo de operação do *OpenDSS* não realize a representação dos sistema de distribuição conforme estes modelos, as capacitâncias *shunt* neste estudo também foram desprezadas pelos mesmos critérios de simplificação e a dificuldade de cálculo e obtenção dos seus valores devido à falta de informações respectivas às características geométricas dos condutores.

Figura 2 – Modelo Pi Equivalente para linhas de transmissão.



Fonte: Retirado de [5].

Figura 3 – Modelo Pi Equivalente para linhas de transmissão curtas.



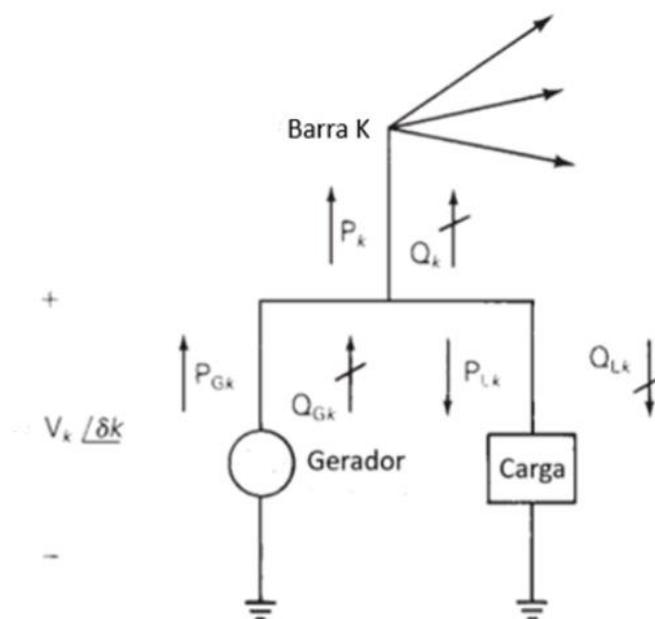
Fonte: Adaptado de [5].

Porém, salienta-se que ao tratar de modelagens envolvendo linhas de distribuição, especialmente ao utilizar o *software* principal deste estudo, as modelagens seguem um mecanismo um pouco mais sofisticado fundamentado na Teoria do Algoritmo de Corrente de Compensação sob o auxílio da ferramenta de fatorização matricial *KLU*solve, os quais serão diretamente explanados na seção introdutória do próprio *OpenDSS*, isto é, as seções 2.3.11 e 2.3.12.

Portanto, no momento da declaração dos valores das variáveis correspondentes ao estudo, será necessário a especificação dos valores de impedância característica com os valores reais e imaginários, sem envolver a declaração ou cálculo das capacitâncias correlacionadas aos trechos dos diferentes tipos de condutores posteriormente informados.

Convencionalmente espera-se que a dinâmica elétrica envolvendo uma análise estática de interação entre os elementos compreendam um fluxo de carga da conforme apresentado na Figura 4:

Figura 4 – Fluxo de Carga Convencional.



Fonte: Adaptado de [9].

A partir da Figura 4, realizando uma correlação com a Lei dos Nós de *Kirchhoff* adaptada para o fluxo de potência:

$$P_k = P_{GK} - P_{LK} \quad (2.2)$$

$$Q_k = Q_{GK} - Q_{LK} \quad (2.3)$$

Sumariamente, cada componente elétrico é conectado a conjuntos denominados barramentos ou barras os quais podem ser classificados de três formas a seguir [9]:

1. Barramento de Referência, ou Barra *Swing*: Existe apenas uma barra nessa configuração, no qual a referência para as análises é estabelecida. Normalmente a sua magnitude é definida como o valor unitário em Por Unidade (PU) e ângulo de defasagem em zero. No *OpenDSS* é esperado que o componente *Circuit* esteja ligado ao barramento de referência.
2. Barramento de carga, ou barra PQ: As cargas ativas ( $P_k$ ) e reativas ( $Q_k$ ) são dados de entrada. São a maioria das barras em uma análise de fluxo de potência e normalmente estão correlacionadas às barras de acoplamento de cargas.
3. Barramento de tensão ou barra PV: ( $P_k$ ) e ( $V_k$ ) são dados de entrada. O programa de fluxo de potência calcula  $Q_k$  e  $\delta_k$  (ângulo da tensão vista pelo gerador). Encontram-se os geradores com exceção da barra *swing*, e capacitores shunt por exemplo. Haverá uma aplicação de uma barra conectada a um elemento de fonte chamado de *Vsource* no estudo, representando um segundo alimentador de energia.

### 2.3 Introdução ao *OpenDSS*

Desenvolvido em 1997 pela empresa Electrotek Concepts, visando avaliar os impactos comumente vivenciados da GD, o software anos mais tarde fora transferido em uma aquisição ao Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica, em inglês: *Electric Power Research Institute* (EPRI), tornou-se uma ferramenta de código aberto destinado a apoiar a integração e a modernização da rede de distribuição, principalmente levando em conta os fenômenos de planejamento e análise de GD. Ele permite que os engenheiros possam realizar análises complexas em uma plataforma de fácil utilização e alta flexibilidade [10]. Seu *download* pode ser realizado através do próprio site do EPRI, visto em [10], junto com o manual de instrução.

O *software* trabalha utilizando linhas de comando em texto de sintaxe própria, tendo como particularidade uma interface chamada *Component Object Model* (COM), atuando com a funcionalidade de operação de comandos através de linguagens de programação de código aberto ou restrito como o MATLAB, C#, VBA, R e diversas outras como principalmente o *Python* [11], o qual será de extrema importância em utilização no estudo.

Além disso, os usuários têm a capacidade de desenvolver DLLs (Dynamic Link Libraries) personalizadas para estender as funcionalidades do *OpenDSS*. Essas bibliotecas dinâmicas escritas pelo usuário podem ser integradas ao simulador, permitindo a implementação de algoritmos, modelos de carga específicos e outras personalizações conforme as necessidades do projeto. Esta modalidade foi inclusa no estudo.

Na Figura 5 logo a seguir segue-se um exemplo prático sobre o painel de execução padrão de códigos do próprio *OpenDSS*, constando o modelo convergente para o campus.

Figura 5 – Visão do painel de codificação do *OpenDSS*.

The screenshot shows the OpenDSS Data Directory window. The main area is a code editor with the following content:

```

clear
!Equivalente de Thevenin PDE 1. Alimentador CAX-01P8
new circuit.EqTheveninUFPE1
~ basekv=13.8 pu=1.000 phases=3 bus1=Barra135
~ Isc=4004.12 Isc1=2459.57 ! Potências de curto-circuito estimadas no barramento B057360
~ x1r1=3.642 x1r0=6.005
!Equivalente de Thevenin PDE 2. Alimentador CAX-01P4
new vsource.EqTheveninUFPE2
~ basekv=13.8 pu=1.000 phases=3 bus1=Barra160
~ Isc=4107.45 Isc1=2419.19 ! Potências de curto-circuito estimadas no barramento B055389
~ x1r1=3.373 x1r0=5.200

//Transformadores [Delta-Estrela Aterrados]
compile [2 - Trafos.DSS]

//LOADS [SE: AAs@veas e Abrigadas] conectadas em delta, potência constante e FP=0,92
compile [3 - Cargas.DSS]

//CAPACITORES em estrela aterrados
New capacitor.cap1 phases=3 bus1=Barra105 kvar=150 kv=13.8
New capacitor.cap2 phases=3 bus1=Barra162 kvar=150 kv=13.8
New capacitor.cap3 phases=3 bus1=Barra161 kvar=150 kv=13.8
// New capacitor.cap4 phases=3 bus1=Barra163 kvar=150 kv=13.8 [Este banco foi desativado após alguns estudos realizados no local].

!LINE CODES
// Linccodes para cada trecho de material condutor diferente
// O modelo adotado para a linha set[ ] o cuto pelas dimensões serem inferiores a 80 km, desprezando-se os efeitos das capacitâncias.
compile [4 - Linccodes.DSS]

!LINES
// Set[ ]o segmentado cada trecho seguidamente de acordo com os linccodes.
compile [5 - Linhas.DSS]
  
```

On the left side, there is a 'Results for Actor ID # 1' panel with the following summary:

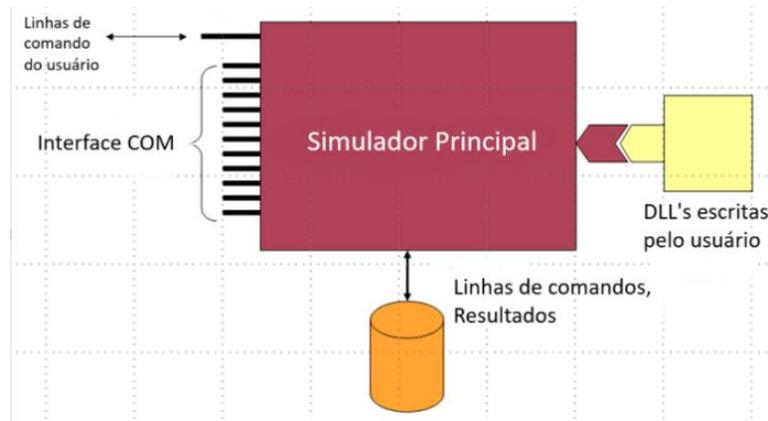
```

Results for Actor ID # 1
CPU selected - 1
Status = SOLVED
Solution Mode = Snap
Number = 100
Load Mult = 1.000
Devices = 383
Buses = 276
Nodes = 828
Control Mode = iSTATIC
Total Iterations = 0
Control Iterations = 0
Max Sol Iter = 0

- Circuit Summary -
Year = 0
Hour = 0
Max pu. voltage = 1
Min pu. voltage = 1
Total Active Power:
7.88762E-009 MW
Total Reactive Power:
-0.00291757 Mvar
Total Active Losses:
4.77375E-009 MW, (60.52 %)
Total Reactive Losses:
-0.00233554 Mvar
Frequency = 60 Hz
Mode = Snap
Control Mode = iSTATIC
Load Model = PowerFlow
  
```

Fonte: Próprio autor.

Figura 6 – Estruturas de operação do *OpenDSS*.



Fonte: Adaptado de [11].

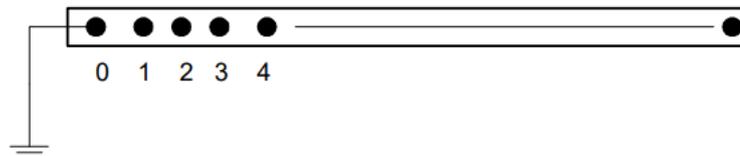
A Figura 6 aborda os três caminhos responsáveis pela comunicação com o simulador do OpenDSS e as saídas resultantes destinadas às análises de fluxo de carga ou curto-circuito por exemplo.

É importante destacar algumas classificações a respeito dos elementos e modelos do *OpenDSS* utilizados no estudo, visualizados a partir do Quadro 1:

Quadro 1 – Elementos do *OpenDSS* utilizados nos estudo

Classificação	Descrição
<i>Power Delivery</i> (PD), elementos de entrega de energia [11]	Consistem em dois ou mais terminais multifásicos. Sua função é transportar energia de um ponto a outro.
<i>Power Conversion</i> (PC), elementos de conversão de energia [11]	Convertem a energia elétrica em outra natureza, (ou vice-versa). Possuem apenas um terminal.
<i>Bus</i> [11]	Barramento constituído por nós de onde saem os condutores de alimentação aos terminais.
<i>Terminal</i> [11]	Condutores ligados em um barramento a um conjunto de nós de um elemento PV ou PC.

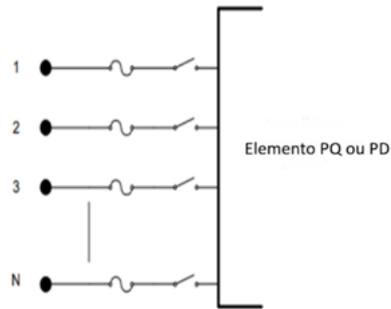
Fonte: Explicitadas em cada elemento do quadro

Figura 7 – Representação do modelo *bus*.

Fonte: Retirado de [11].

A Figura 7 aborda sobre o elemento bus, criado sobre a construção de “n” nós, os quais estarão conectados em terminais de um elemento PC ou PD.

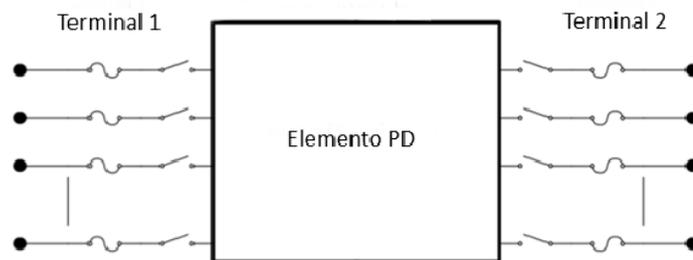
Figura 8 – Representação do modelo *Terminal*.



Fonte: Retirado de [11].

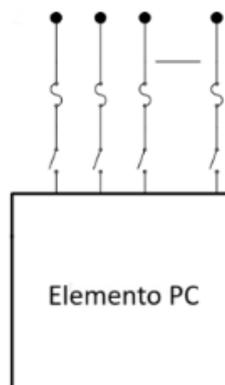
A Figura 8 aborda sobre os terminais, estes sendo os segmentos de condutores que fazem a conexão entre barramentos e elementos PQ e PD, vistos a seguir respectivamente de acordo com as Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Representação do elemento PD.



Fonte: Retirado de [11].

Figura 10 – Representação do elemento PC.



Fonte: Retirado de [11].

A seguir, serão destacados alguns exemplos dos componentes e elementos utilizados no trabalho de acordo com a arquitetura e sintaxe do *OpenDSS*. Cabe salientar os seguintes detalhes construtivos presentes no manual [11]:

- Os caracteres “!” e “//” significam comentários e não impactam na sintaxe.
- O caractere “~” significa uma segmentação na próxima linha mantendo o comando iniciado.
- A definição de qualquer elemento sempre inicia com o comando *new*, logo após virá o seu nome.
- Comandos possuindo *bus* servem para declarar o barramento ligado aos elementos. *Bus1* sugere um barramento ligado a um terminal primário, enquanto *bus2* sugere um barramento ligado a um terminal secundário.
- Comandos como *basekv*, *kv*, *kva* servem para definir respectivamente a tensão de base, a tensão ou a potência de operação para o elemento definido.
- *Phases* ou *Nphases*: Indicam a quantidade de fases utilizadas no elemento. Trifásico para o estudo vigente.

O *OpenDSS* possui uma série de objetos representando os componentes elétricos a serem utilizados no estudo, dentre os quais podem ser destacados:

### 2.3.1 Linecode

```
// 4 AWG Alumínio nu com alma de aço
New linecode.Aluminio4AWG nphases=3 BaseFreq=60
~ r1=1.71154049254 x1=0.458926075079 r0=1.88988978648 x0=1.96869438841
!ohm/km
~ units=km
```

O elemento *LineCode* [11] Contêm características de impedância para linhas e cabos. Referenciam características comuns aos diversos elementos de linha “*line*” sem a necessidade de realizar-se um retrabalho na descrição de linhas com a mesma característica. Cabe salientar as seguintes particularidades sobre a declaração desse elemento:

- *BaseFreq*: Indica qual será a frequência nominal de operação do elemento.
- R1 e R0: Define o valor de resistência de sequência positiva (e negativa) e sequência zero características por unidade de comprimento referente ao tipo de condutor utilizado.
- X1 e X0: Define o valor de reatância indutiva de sequência positiva (e negativa) características por unidade de comprimento referente ao tipo de condutor utilizado.
- *Units*: Unidade de comprimento de referência para os componentes característicos do elemento.

### 2.3.2 *Vsource*

```
!Fonte de tensão do PDE 2, Alimentador CAX-01P4
new vsource.EqTheveninUFPE2
~ basekv=13.8 pu=1.000 phases=3 bus1=Barra160
~Isc3=4107.45 Isc1=2419.19 !Potências de curto-circuito estimadas no
~barramento B055389
~ x1r1=3.373 x0r0=5.200
```

O elemento *Vsource* [11] é um Elemento PC, constitui uma fonte de tensão. Será representada para o sinal de potência um alimentador secundário, pois o outro será utilizado como o Equivalente de *Thévenin* de referência.

- PU: Fator percentual para a tensão nominal do elemento *bus*.
- I<sub>sc3</sub> e I<sub>sc1</sub>: Valor respectivo de magnitude da corrente de curto-circuito trifásica e monofásica previstas no elemento *bus*.
- X<sub>1r1</sub> e X<sub>0r0</sub>: Relações respectivas de componentes simétricos positivos (e negativos) entre reatância indutiva do circuito sobre a resistência ( $\frac{X_1}{R_1}$ ) e ( $\frac{X_0}{R_0}$ ).

### 2.3.3 Capacitor

```
//CAPCITORES em estrela aterrados
New capacitor.cap1 phases=3 bus1=Barra105 kvar=150 kv=13.8 conn=delta
```

Elemento capacitor [11] é um elemento PD de dois terminais. Todos conectados em delta (comando “conn”).

### 2.3.4 Lines

```
// Serão segmentados cada trecho seguidamente de acordo com os linecodes.
New line.Linha1 phases=3 bus1=Barra98 bus2=Barra99 length=0.06323 units=km
~linecode=Aluminio4AWG
```

*Line* (Linha) [11] é um elemento PD usado para modelar a maioria das linhas ou cabos multifásicos entre dois terminais. As impedâncias podem ser especificadas por valores de componentes simétricos ou por valores de matriz.

- *Length*: Define o valor de resistência de sequência positiva característica por unidade de comprimento referente ao tipo de condutor utilizado
- *Linecode*: Define qual será o elemento *linecode* vinculado ao trecho de linha informado.

### 2.3.5 Transformer

```
//Transformadores (Delta-Estrela Aterrados)

New transformer.trafo1 windings=2 !Iluminação pública.

~ wdg=1 bus=Barra1 kv=13.8 kva=75 conn=delta

~ wdg=2 bus=Barra1_2 1.2.3.0 kv=.38 kva=75 conn=wye
```

*Transformer* (Transformador) [11] é um elemento PD multiterminal (dois ou mais). No estudo todos serão representados possuindo ligações delta - estrela aterrados.

- *Windings*: Determina a quantidade de enrolamentos do transformador.
- *Wdg*: Determina sob qual enrolamento os dados elétricos serão definidos.
- *Conn*: Determina o esquema de conexão do enrolamento em definição, *delta* como *delta* mesmo e estrela como *wye*.

### 2.3.6 Load

```
//LOADS conectadas em estrela, potência constante e FP definido pelo usuário

New load.Carga1 phases=3 model=1 bus=Barra1_2 kv=.38 kva=75 pf=.92

~conn=wye daily=IP !Iluminação pública.
```

*Load* (Carga) [11] é um elemento PC definido pelas suas potências ativas e reativas e fator de potência (FP) a ser definido pelo usuário no *script* do *Python*. Aqui a carga está sendo representada possuindo uma conexão em estrela e fator de potência em 0,92 conforme as solicitações da distribuidora local.

- *Model*: Indica o arranjo a ser utilizado na carga, para este caso, adotou-se o índice “1” a fim de dizer que o arranjo será para uma carga com potência constante com 75 kva.

- Pf: Define o fator de potência a ser utilizado. Os valores previamente adotados serão de 0,92 indutivos por tratarem do limite mínimo solicitado pela ANEEL [40].
- *Daily*: Vincula uma curva de carga (*loadshape*) de intervalo diário à carga em questão.

### 2.3.7 *Energymeter*

```
// Medidores (comentados favorecendo uma melhor interação no script do Python)
//New energymeter.medidorCAX01P4 element=Line.Linha106 terminal=2
```

Um *energymeter* [11] é um medidor inteligente conectado a um terminal de um elemento de circuito, buscando fazer a medição e a impressão de sinais de energia necessários.

### 2.3.8 *Circuit*

```
!Equivalente de Thévenin PDE 1, Alimentador CAX-01P8
new circuit.EqTheveninUFPE1
~ basekv=13.8 pu=1.000 phases=3 bus1=Barra135
~ Isc3=4004.12 ISC1=2459.57
~ x1r1=3.642 x0r0=6.005
```

*Circuit* [11] é o objeto primordial, pois trata do Equivalente de Thévenin entregando os sinais de energia a montante do alimentador em análise para o estudo. As mesmas observações se aplicam ao elemento *Vsource*.

### 2.3.9 Loadshape

```
//Curvas de Cargas
```

```
New Loadshape.Integral npts=24 interval=1 mult = (0 0 0 0 .02 0.09 0.2 0.4 0.45 0.5  
~0.56 0.6 0.6 0.54 0.5 0.38 0.2 0.17 0.1 0.05 0.01 0.01 0.01 0)
```

*Loadshape* [11] se refere a uma curva de carga destinada a modelar um comportamento de consumo ou geração em um formato de intervalo de tempo definido pelo usuário.

- *Npts*: Número de pontos definidos para a curva de carga.
- *Interval*: Intervalo definido para a armazenagem dos dados de análise dentre os pontos da curva de carga. Para este caso propõe-se armazenar a todos os pontos.
- *Mult*: Valor do multiplicador referente ao valor nominal da carga ou do módulo de geração vinculado à tal *loadshape*.

Por particularidade deste trabalho, quatro curvas de carga foram construídas de acordo com os horários de funcionamento dos cursos da universidade, isto é, turnos: integral, vespertino, noturno e iluminação pública, enquanto também foram construídas com valores genéricos com capacidade máxima de utilização das cargas nominais de cada centro acadêmico vinculado a uma curva de carga não excedendo os 60% de utilização de suas cargas instaladas declaradas. Já a curva de carga destinada à GD terá os seus valores definidos na subseção 2.5 posteriormente.

### 2.3.10 Generator

```
//Estações de mini-geração distribuídas da UFPE, modeladas para a geração com
~FP=1,00.

New generator.GeracaoCTG phases=3 bus1=barra90_2 kv=.38 kw=273 pf=1
~daily=PV
```

*Generator* [11] é um elemento destinado ao bloco de GD inserido na rede. Para o caso do trabalho, haverá dois blocos geradores, um no CTG e um no CCSA.

### 2.3.11 O Algoritmo das Correntes de Compensação

O *OpenDSS* busca primeiramente realizar o cálculos numéricos iteráveis a partir das matrizes de admitâncias nodais de cada elemento declarado para a rede de distribuição possibilitando que o mecanismo do *KLU* solve entre em ação, tendo a finalidade de decompor a matriz de admitância nodal do sistema e fazendo a sua inversão segundo consta em [12]. O mecanismo do *KLU* solve é um pacote de *software* desenvolvido em linguagem C com uma interface *MATLAB* para resolver sistemas lineares assimétricos esparsos de equações que surgem em aplicações de simulação de circuitos, e pode ser estudado em [13].

O aplicativo deve computar todas as matrizes nodais dos elementos após realizar o mapeamento envolvendo as suas conexões dentre os barramentos, entregando também as correntes injetadas calculadas mais as correntes de compensação, estas conforme as equações 2.4 e 2.5 respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \overline{S^*} \\ \frac{3\dot{V}_a^*}{\overline{S^*}} \\ \overline{S^*} \\ \frac{3\dot{V}_b^*}{\overline{S^*}} \\ \overline{S^*} \\ \frac{3\dot{V}_c^*}{\overline{S^*}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

As correntes injetadas são calculadas utilizando o modelo de cargas e/ou geradores modelados como sendo de potências constantes. Serão utilizadas por

meio de iterações nos cálculos das correntes de compensação conforme a Equação 2.5 dentre a qual pode-se compreender os elementos de admitâncias vistas na Equação 2.6.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{C_a} \\ \dot{I}_{C_b} \\ \dot{I}_{C_{ac}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{i_a} \\ \dot{I}_{i_b} \\ \dot{I}_{i_c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_a & \bar{Y}_b & \bar{Y}_b \\ \bar{Y}_b & \bar{Y}_a & \bar{Y}_b \\ \bar{Y}_b & \bar{Y}_b & \bar{Y}_a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

No qual:

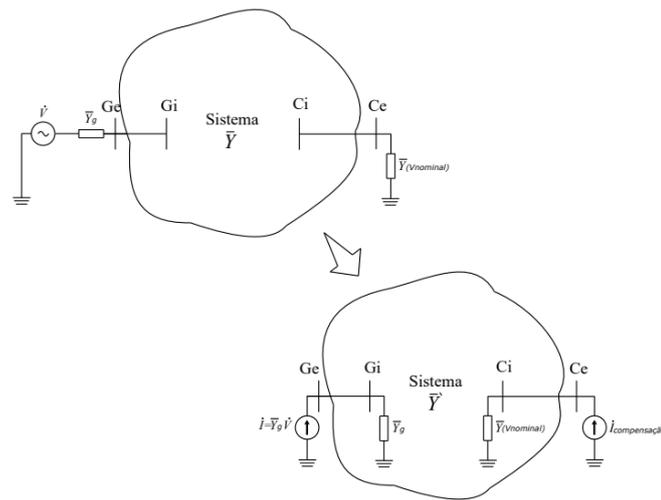
$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_a \\ \bar{Y}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\bar{Y} \\ -\bar{Y} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

“A corrente de compensação é a corrente calculada nas barras que apresentam cargas e/ou geradores cujos modelos são não lineares. O *OpenDSS* calcula a matriz de admitâncias nodais da carga e/ou gerador na condição de tensão nominal e a inclui na matriz de admitâncias nodais da rede completa, essa matriz de admitâncias nodais calculada na tensão nominal representa a parcela linear do elemento” (Paulo Ricardo Radatz de Freitas, 2015, p.85). [12]

Salienta-se que o objetivo primordial do algoritmo é que os passos acima converjam para resultados esperados de tensões em cada barramento de acordo com a equação 2.7 logo a seguir, possibilitando uma melhor visualização das grandezas estudadas nesta seção introdutória segundo a Figura 11:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_J \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \dots & \bar{Y}_{1J} & \dots & \bar{Y}_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{Y}_{J1} & \dots & \bar{Y}_{JJ} & \dots & \bar{Y}_{JN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{Y}_{N1} & \dots & \bar{Y}_{NJ} & \dots & \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_J \\ \vdots \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Figura 11- Modificação do condicionamento para o fluxo de potência no algoritmo.



Fonte: Retirado de [12].

### 2.3.12 Passos para a resolução do algoritmo:

Em [12] destaca-se os 4 passos necessários para a convergência do algoritmo a partir da realização das iterações:

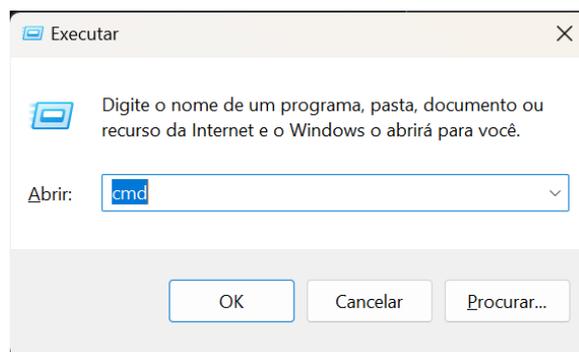
1. Calculam-se valores próximos da solução para as tensões nodais.
2. Calculam-se as correntes injetadas e as correntes de compensação;
3. O *KLU* resolve calcula as tensões nodais da próxima iteração;
4. Repetem-se os itens 2 e 3 até a convergência de 0,0001 pu nas tensões nodais.

### 2.3.13 A escolha do Python como mecanismo de controle do OpenDSS

A interface COM foi utilizada a fim de realizar a comunicação do *script* em linguagem de programação *Python* aos arquivos desenvolvidos para as simulações no *OpenDSS* partir de uma biblioteca chamada “py-dss-interface” [14], desenvolvida e disponibilizada pelos funcionários do EPRI gratuitamente para dispositivos de sistema operacional (SO) *Windows*. Seu download pode ser feito a partir da instalação do *Python* em [15] e ao abrir o *prompt* de comando do *Windows* ao pressionar simultaneamente tecla *Windows* + tecla “R” e digitar “cmd”. Outras

bibliotecas também são fundamentais para o andamento, como por exemplo a “os” e a “pathlib”, visando realizar respectivamente o vínculo do arquivo principal do projeto com o SO utilizado e a declaração do projeto criado e o arquivo principal constando o *script*. Após o *prompt* estar disponível, deve-se digitar o comando “*pip install py-dss-interface*” e aguardar a sua instalação conforme as Figuras 12 e 13:

Figura 12 – Abertura do *prompt* visando a instalação da *py-dss-interface*.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13 – Instalação da biblioteca através do *prompt* de comando do *Windows*.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd. x + v
Microsoft Windows [versão 10.0.22621.2861]
(c) Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.
C:\Users\edson>pip install py-dss-interface
```

Fonte: Próprio autor.

Para a utilização dessa modalidade de linguagem de programação, optou-se por um Ambiente de desenvolvimento integrado, ou em inglês: *integrated development environment* (IDE) chamada de Pycharm, cuja instalação encontra-se em [16]. A fim de facilitar a organização e a leitura dos documentos utilizados neste trabalho, é sugerido criar um projeto utilizando o Pycharm, tal projeto foi denominado “REDEUFPE”.

O projeto será criado com uma pasta e um arquivo principal com extensão “py” chamado de “*main*”, este arquivo receberá o código de comando (junto com os

laços) para o arquivo legível principal do *OpenDSS*. Dentro da pasta também estarão todos os arquivos principais e secundários necessários para as simulações.

A partir das especificações necessárias à construção do código de comando no *OpenDSS*, será abordado logo a seguir sobre a Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD), viabilizando uma solicitação de dados de curto-circuito à concessionária de energia local, possibilitando a transcrição dos elementos legíveis no *OpenDSS* vistos nos pontos geográficos declarados pela própria concessionária.

### 3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO TRABALHO

De posse do arcabouço teórico necessário para a obtenção dos resultados, decidiu-se segmentar o trabalho em etapas progressivas a fim de serem mais intuitivas e explanatórias aos interessados no estudo.

#### 3.1 Acesso à BDGD

A BDGD foi instaurada a partir da implementação do Módulo 10 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) e engloba informações técnicas e geográficas pertinentes à infraestrutura elétrica atendida por todas as distribuidoras presentes em solo nacional em todos os níveis de tensão [17]. A base de dados é dividida em Entidades Geográficas e Entidades Não Geográficas, diferenciando-se sugestivamente a partir de vínculos com coordenadas geográficas vinculadas a informações específicas, apesar de ambas poderem ser exportadas como tabelas legíveis em planilhas eletrônicas, a exemplo do Quadro 2 e 3 respectivamente:

Quadro 2 – Entidades Geográficas abordadas no estudo.

Nome	Sigla	Tipo de Feição	Descrição
Subestação	SUB	Polígono	Representa o espaço físico ocupado por uma Subestação
Segmento do Sistema de Distribuição de Média Tensão	SSDMT	Linha	Representa o traçado de um segmento de média tensão entre duas estruturas de suporte

Fonte: Retirado de [17].

Quadro 3 – Entidade Não Geográfica abordada no estudo.

Nome	Sigla	Descrição
Circuito de Média Tensão	CTMT	Representa um circuito de média tensão existente no sistema de distribuição local

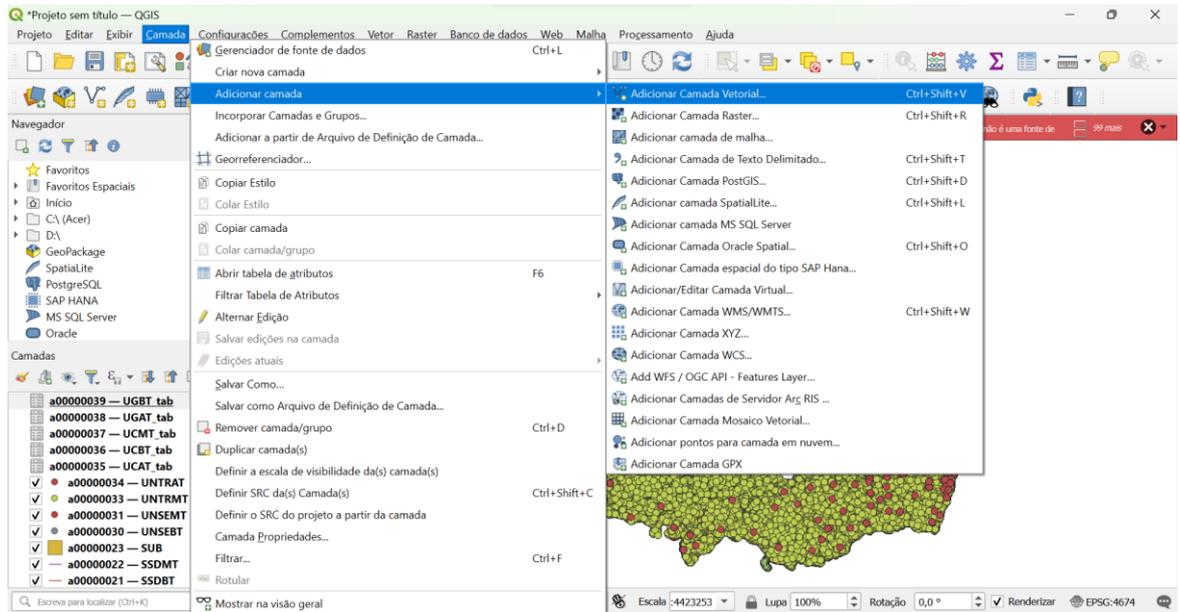
Fonte: Retirado de [17].

O arquivo em formato ZIP (extensão em gdb) constando todas as entidades geográficas não geográficas podem ser encontradas em [18].

Após realizar o *download* do arquivo da concessionária de energia de interesse, o próximo passo é realizar o download de um software de interpretação de coordenadas geográficas como o QGIS ou o ArcGIS por exemplo. A ANEEL sugere a utilização do QGIS cuja instalação encontra-se em [19] no Manual do Usuário para acesso aos dados da BDGD [20], sendo este o utilizado para o propósito. Ao extrair o conteúdo inicial, um arquivo com extensão “gdb” será criado e será utilizado na leitura através do QGIS. Ao inicializar o programa, deve-se seguir o seguinte passo a passo a fim de interpretar os dados da concessionária de interesse:

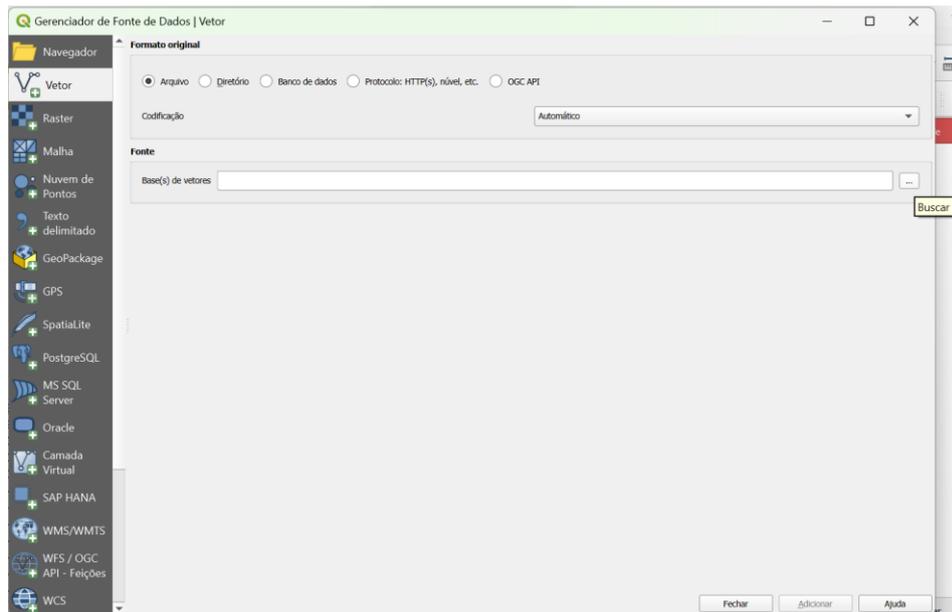
1. Clicar na aba de "Camada", visto na Figura 14;
2. Clicar no comando de “Adicionar camada”, visto na Figura 14;
3. Clicar no comando de “Adicionar Camada Vetorial”, visto na Figura 14;
4. Selecionar a opção de arquivo e clicar nas reticências na Fonte da Base(s) de vetores, visto na Figura 15;
5. Procurar o diretório do arquivo “gdb” e abri-lo, visto na Figura 16;
6. Selecionar as camadas (ou entidades) de interesse, visto na Figura 16;
7. Selecionar a opção de adicionar, visto na Figura 17;

Figura 14 – Tutorial 1 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS



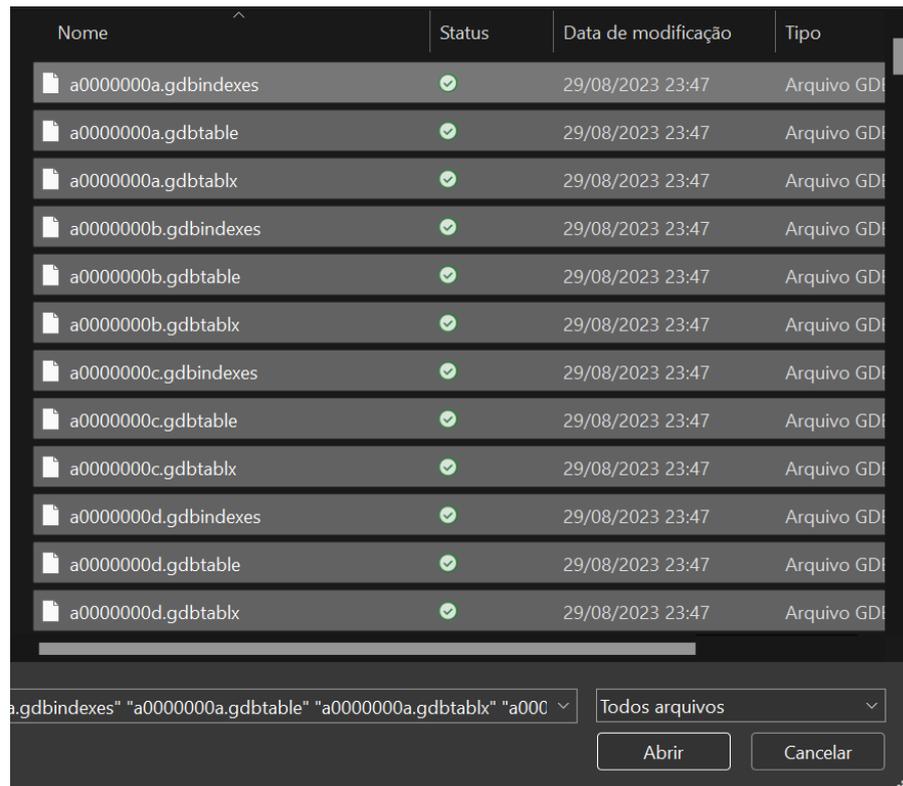
Fonte: Próprio autor

Figura 15 – Tutorial 2 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS



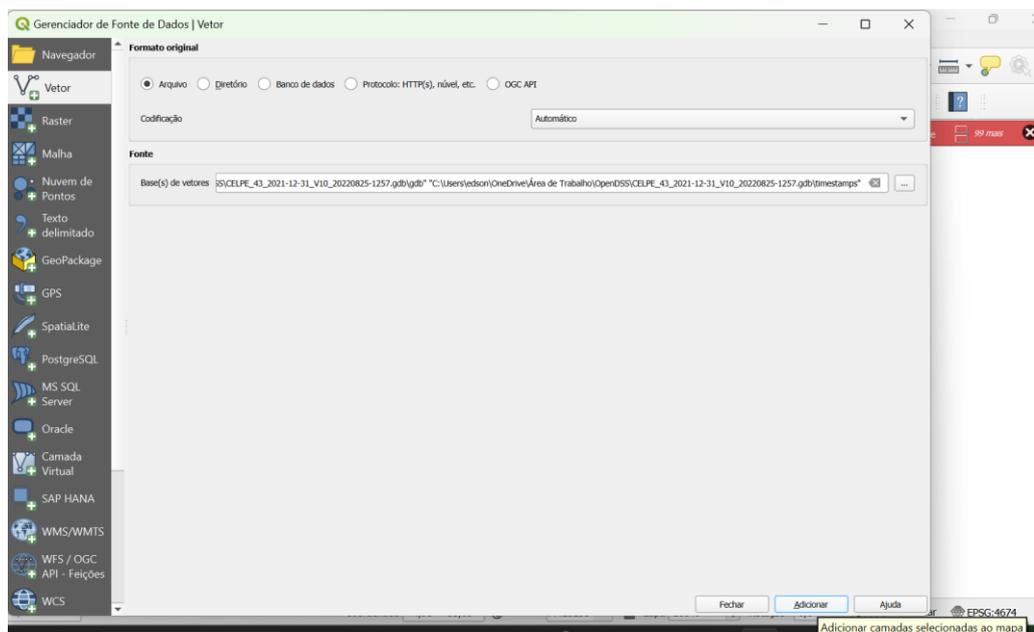
Fonte: Próprio autor

Figura 16 – Tutorial 3 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS



Fonte: Próprio autor.

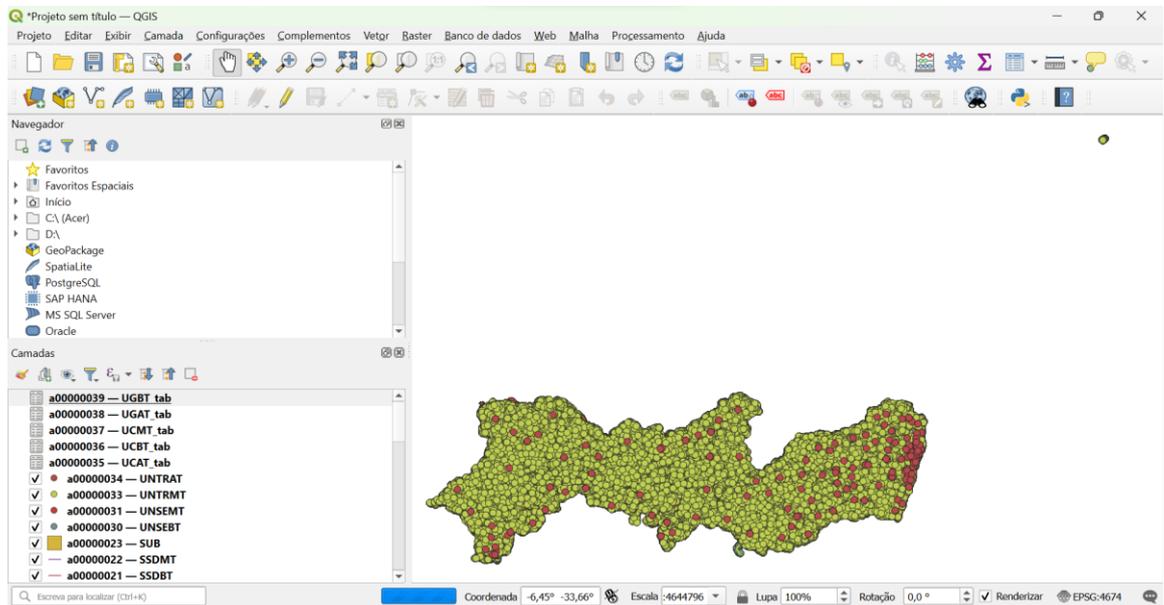
Figura 17 – Tutorial 4 de acesso aos dados do BDGD através do QGIS.



Fonte: Próprio autor.

Após essas etapas, chega-se ao ponto de poder analisar todas as camadas de interesse com a seguinte representação vista na importação de dados da concessionária, conforme a Figura 18:

Figura 18 – Representação das camadas da BDGD.

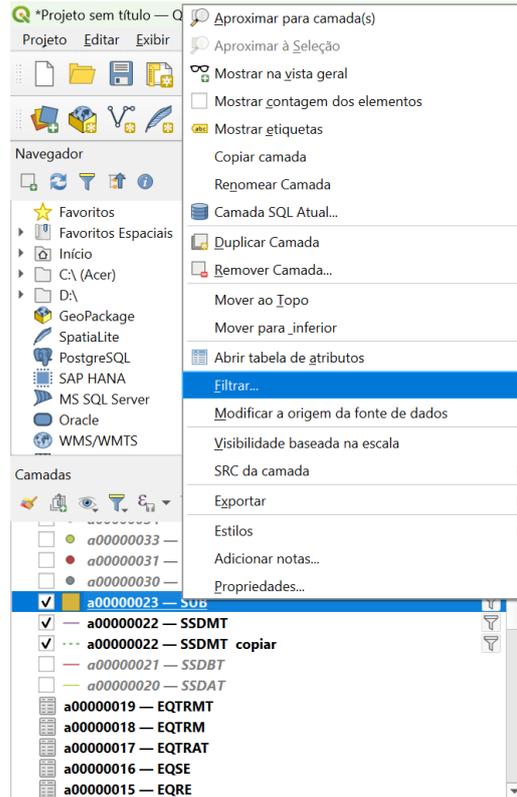


Fonte: Próprio autor.

A partir da obtenção das camadas, parte-se para a obtenção do traçado dos alimentadores a serem utilizados no trabalho, conforme os passos a seguir:

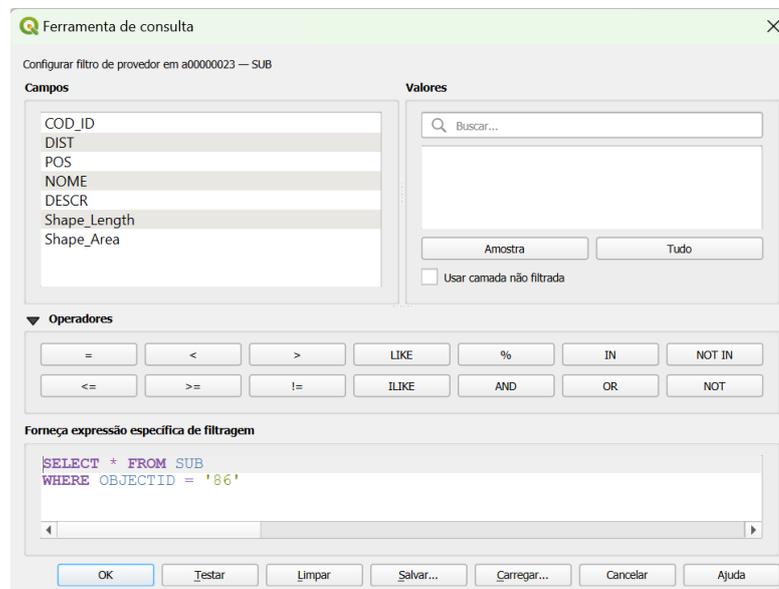
1. Selecionar apenas as entidades a serem utilizadas no trabalho (SUB e SSDMT para este estudo);
2. Com o botão direito do *mouse*, escolher a opção de “Filtrar”, visto na Figura 19. Nesta mesma etapa também pode-se duplicar uma camada através do comando “Duplicar Camada”, sendo fundamental realizar este artifício a fim de visualizar as informações do segundo alimentador a ser observado;
3. Inserir o comando de filtro em linguagem *Structured Query Language* (SQL) a fim de selecionar a opção da camada de interesse, visto na Figura 20.

Figura 19 – Tutorial para a filtragem das camadas no QGIS.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Painel de filtro para a camada das subestações com o código da SUB Caxangá.



Fonte: Próprio autor.

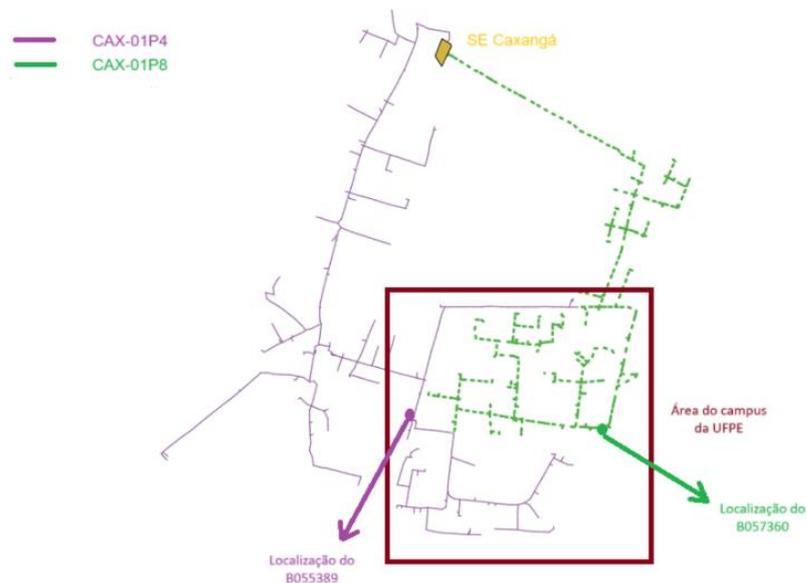
Para o estudo, deve-se utilizar os seguintes filtros numéricos para as camadas SUB e SSDMT, conforme o Quadro 4:

Quadro 4 – Entidade Não Geográfica abordada no estudo

Subestação Caxangá (SUB)	<i>SELECT * FROM SUB WHERE OBJECTID = '86'</i>
Alimentador CAX-01P4 (SSDMT)	<i>SELECT * FROM SSDMT WHERE CTMT = '792'</i>
Alimentador CAX-01P8 (SSDMT)	<i>SELECT * FROM SSDMT WHERE CTMT = '127'</i>

Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Resultado dos filtros para as entidades em observação.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 21, observa-se o traçado dos alimentadores em média tensão que partem da Subestação Caxangá e contornam o bairro da Várzea no Recife, até chegarem ao campus. O polígono hachurado na cor de mostarda é a própria subestação, enquanto o alimentador CAX-01P4 é representado com o

traçado na cor lilás em linha contínua, enquanto o CAX-01P8 é representado na cor verde musgo em linha tracejada. Ao pôr o cursor do *mouse* nos pontos de entrada do campus, encontram-se as seguintes coordenadas fundamentais visualizadas na Tabela 1, possibilitando a solicitação dos dados de curto-circuito à concessionária de energia local:

Tabela 1 – Coordenadas de fornecimento de energia do campus.

Alimentador	Latitude	Longitude
CAX-01P4	-8.0515031	-34.9550680
CAX-01P8	-8.0518212	-34.9464866

Fonte: Próprio autor.

Essas coordenadas coincidirão com o local de inserção dos elementos de medição necessários para a obtenção dos resultados.

Formalmente, a concessionária de energia local cedeu os dados de curto-circuito (necessários para a construção do estudo do código do *OpenDSS*) para os barramentos cadastrados em tais coordenadas. Tais dados dos barramentos podem ser contemplados através da Figura 22 e 23.

Figura 22 – Dados de Curto-Circuito para o barramento B055389, poste de entrada de energia através do alimentador CAX-01P4.

Nó/Transformador	CC	Alimentador
Método	Calculado	
Título	Nó B055389 (id=2705691)	
= Z1		
PU base 100 MVA	0,2895 +j 0,9766	
Ohms	0,5514 +j 1,8597	
= Z0		
PU base 100 MVA	0,5959 +j 3,0991	
Ohms	1,1348 +j 5,9020	
= Simétrico (A)		
Trifásico	4107,45   -73,49	
Fase-Fase	3557,15   -73,49	
Fase-Fase-Terra	1713,19   -78,33	
Fase-Terra	2419,69   -76,91	
Fase-Terra Mínimo	194,94   -4,50	
= Correntes de Sequencias		
= Assimétrico (A)		
Trifásico	4107,449	
Fase-Fase	3557,156	
Fase-Terra	2419,709	
Fase-Terra Mínimo	194,937	
= Pico		
Trifásico	5812,183	
Fase-Fase	5033,498	
Fase-Terra	3431,862	
Fase-Terra Mínimo	275,682	
= Relação X/R		
Trifásico	3,373	
Fase-Fase	3,373	
Fase-Terra	4,300	
Fase-Terra Mínimo	0,079	

Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Dados de Curto-Circuito para o barramento B057360, poste de entrada de energia através do alimentador CAX-01P8

Nó/Transformador	CC	Alimentador
Método	Calculado	
Título	Nó B057360 (id=2557452)	
= Z1		
PU base 100 MVA	0,2847 +j 1,0053	
Ohms	0,5421 +j 1,9145	
= Z0		
PU base 100 MVA	0,4962 +j 2,9798	
Ohms	0,9450 +j 5,6748	
= Simétrico (A)		
Trifásico	4004,12   -74,19	
Fase-Fase	3467,67   -74,19	
Fase-Fase-Terra	1772,48   -79,61	
Fase-Terra	2459,57   -77,95	
Fase-Terra Mínimo	195,28   -4,45	
= Correntes de Sequencias		
= Assimétrico (A)		
Trifásico	4004,127	
Fase-Fase	3467,676	
Fase-Terra	2459,626	
Fase-Terra Mínimo	195,282	
= Pico		
Trifásico	5667,283	
Fase-Fase	4908,012	
Fase-Terra	3494,612	
Fase-Terra Mínimo	276,171	
= Relação X/R		
Trifásico	3,532	
Fase-Fase	3,532	
Fase-Terra	4,684	
Fase-Terra Mínimo	0,078	

Fonte: Próprio autor.

### 3.2 Elementos que compõe a GD no estudo

O Campus abarca duas usinas fotovoltaicas de grande porte localizadas no domínio do Centro de Tecnologias e Geociências (CTG) e do Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA), ambas constituídas de módulos fotovoltaicos AstroAtom™ de 345 Wp de potência máxima de geração [21], contribuindo respectivamente com uma carga instalada disponível para geração de 273 kWp e 119 kWp [22]. A usina do CTG pode ser visualizada na Figura 24.

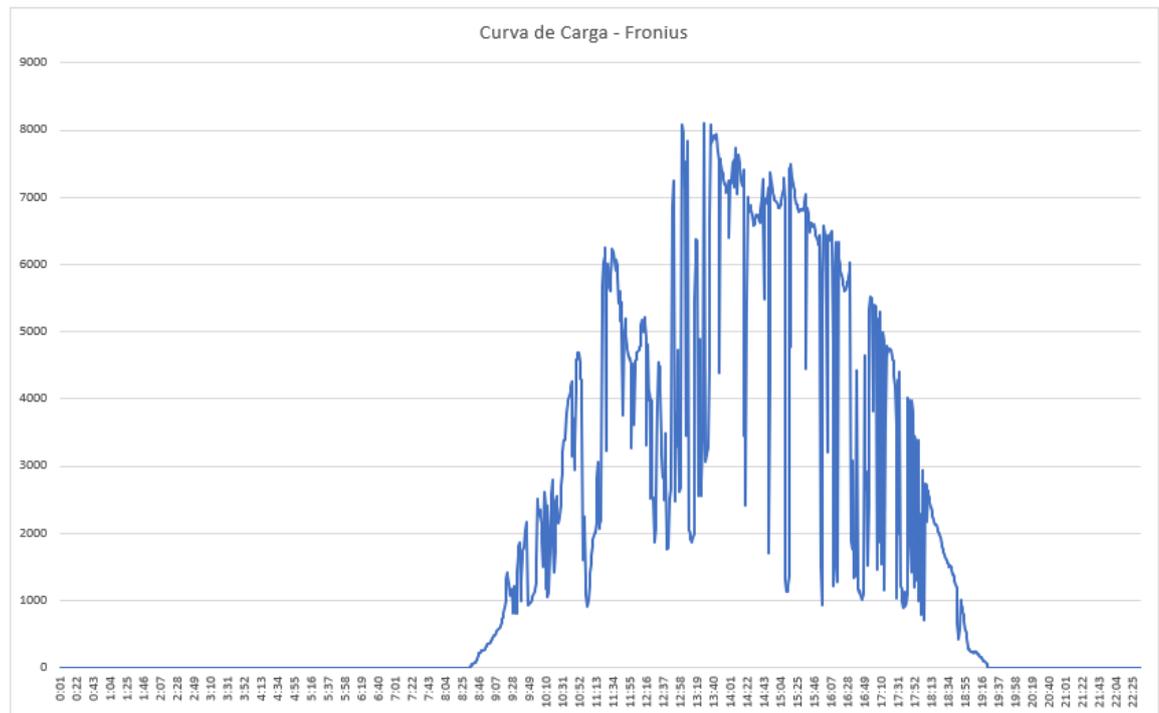
Figura 24 – Vista aérea da usina fotovoltaica do CTG.



Fonte: Próprio autor.

A fim de possibilitar a construção dos dados de simulação, houve a necessidade de uma importação de dados registrados na saída dos inversores de frequência de uma cabine de geração de testes em GD nas imediações do Laboratório de Armazenamento e Mobilidade (LAM) o qual situa-se próximo à usina em estudo, informando as seguintes especificações de geração de energia em *Watts* (W) visualizadas na Figura 25:

Figura 25 – Registro de dados de GD nas imediações do CTG.



Fonte: Próprio autor.

Estes resultados de geração foram extraídos a partir de um dia de geração expressiva no dia 25 de março de 2023, considerando um dia típico de verão na cidade do Recife. A partir de tal obtenção, adotou-se um critério de traçar uma curva com os valores discretos de geração máxima apresentados no gráfico anterior em um intervalo de uma hora, visando encontrar os fatores de carga apropriados, justificados logo a seguir, conforme a Figura 26:

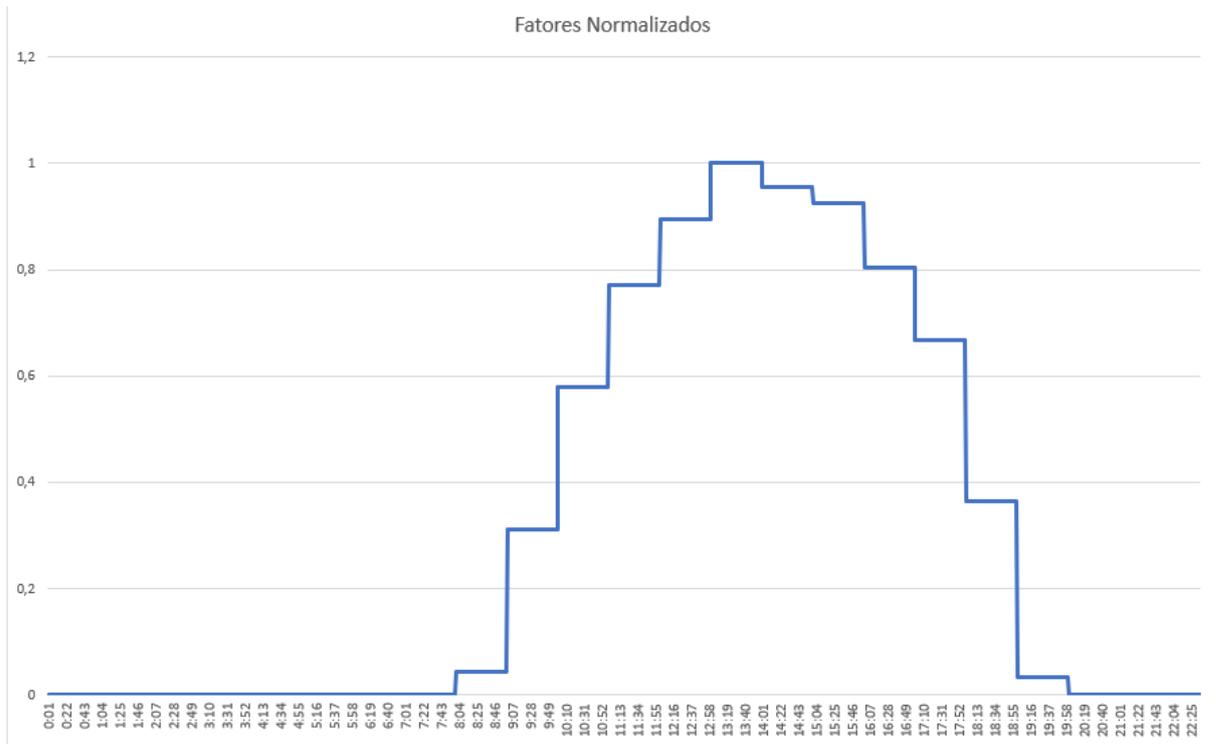
Figura 26 – Máximas potências de geração registradas



Fonte: Próprio autor

Com base nesses registros de sinais de geração, pôde-se obter os valores responsáveis para a construção da curva de carga destinados aos geradores acoplados à rede. O método utilizado se baseou na normalização dos valores presentes na Figura 26 dividindo-se pelo valor de máxima geração previsto no dia, isto é, 8,097 kWp, encontrando-se os seguintes resultados presentes na Figura 27:

Figura 27– Máximas potências de geração registradas

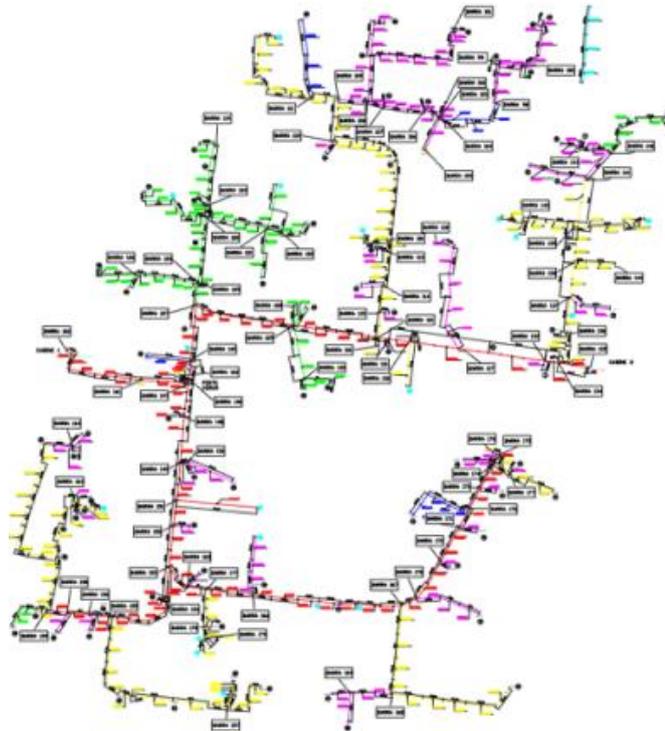


Fonte: Próprio autor

### 3.3 Definição dos barramentos e elementos utilizados a partir da planta baixa da UFPE

De posse da planta baixa em extensão DWG do campus disponibilizada pela SINFRA, visualizada conforme a Figura 28, o autor pôde zelosamente estudar cada ponto de entrada de fornecimento de energia, cada ponto de derivação entre condutores, cada ponto de conexão com os transformadores, capacitores e subestações declaradas e a partir dos quais, denominar as legendas para cada elemento e barramentos a serem declarados nos blocos de notas legíveis e interpretáveis posteriormente pelo *OpenDSS*.

Figura 28 – Planta da rede de distribuição da UFPE



Fonte: Próprio autor.

Ao avaliar minuciosamente os detalhes da planta, no total serão declarados no *OpenDSS* a seguinte quantidade de elementos, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Quantidade de elementos a serem declarados no *OpenDSS*

Elemento	Quantidade
Barramento	181
Segmento de linha	184
Transformador	97
Capacitor	3
Carga	97

Fonte: Próprio autor

Evidentemente, outros elementos serão incluídos, como as informações pertinentes aos alimentadores, curvas de carga e dados de GD de acordo com as informações abordadas na fundamentação teórica.

Outra observação importante foi a informação das particularidades de impedâncias características dos condutores presentes nos diferentes trechos de linha. A SINFRA disponibilizou esses dados referenciados na própria planta do campus, sendo fundamental para a declaração dos informações necessárias para a interpretação das linhas. Essas informações foram inseridas no arquivo destinado às *linecodes*, constando as referidas informações logo a seguir, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 – Impedâncias características dos condutores em  $\Omega/\text{km}$ , declarados em *Linecodes*

Condutor	Sequência positiva/negativa	Sequência zero
4 AWG alumínio nu com alma de aço	$r_1 = 1,71154049254$ $x_1 = 0,458926075079$	$r_0 = 1,88988978648$ $x_0 = 1,96869438841$
2/0 alumínio nu com alma de aço	$r_1 = 1,71154049254$ $x_1 = 0,458926075079$	$r_0 = 1,88988978648$ $x_0 = 1,96869438841$
2 AWG alumínio nu com alma de aço	$r_1 = 1,19188171597$ $x_1 = 0,441390625194$	$r_0 = 1,23909084659$ $x_0 = 1,96612051357$
35 mm <sup>2</sup> alumínio Protegido	$r_1 = 1,06104463378$ $x_1 = 0,456299556363$	$r_0 = 1,23909084659$ $x_0 = 1,96612051357$
25 mm <sup>2</sup> cobre nu	$r_1 = 0,965711022529$ $x_1 = 0,465388247558$	$r_0 = 1,14375828032$ $x_0 = 1,97467490899$
4/0 Alumínio nu com alma de aço	$r_1 = 0,557684750626$ $x_1 = 1,90713311515$	$r_0 = 0,557684750626$ $x_0 = 1,90713311515$

Fonte: Próprio autor.

### 3.4 Declaração dos dados de simulação nos documentos legíveis ao *OpenDSS*

Após evidenciar os elementos necessários para a aplicação no estudo, iniciou-se a representação de cada um destes elementos em blocos de notas conforme a sintaxe do *OpenDSS* (vistos no tópico 2.3) dentro do diretório destinado ao projeto criado através do auxílio do IDE, denominado de REDEUFPE. Uma estratégia de comunicação entre os diferentes arquivos partiu da ideia de dividir em dois arquivos primordiais denominados de “Principal” e “Secundario” os quais diferenciam respectivamente a inclusão ou não da GD no CTG e CCSA. Cada um destes arquivos possui quase as mesmas características atuando através dos comandos “*compile*” segmentados nas linhas de código. Estes comandos têm a função de se comunicar com outros arquivos coadjuvantes constando a grande maioria dos elementos vivenciados no trabalho como os transformadores, linhas, características das linhas, cargas, curvas de carga e geradores por exemplo. Uma exceção se deu para os capacitores, por serem poucos equipamentos estes foram declarados diretamente nos arquivos primordiais. Todos os arquivos legíveis na sintaxe do *OpenDSS* podem ser evidenciados segundo a Figura 29 logo a seguir.

Figura 29 – Arquivos legíveis ao *OpenDSS* no diretório REDEUFPE.

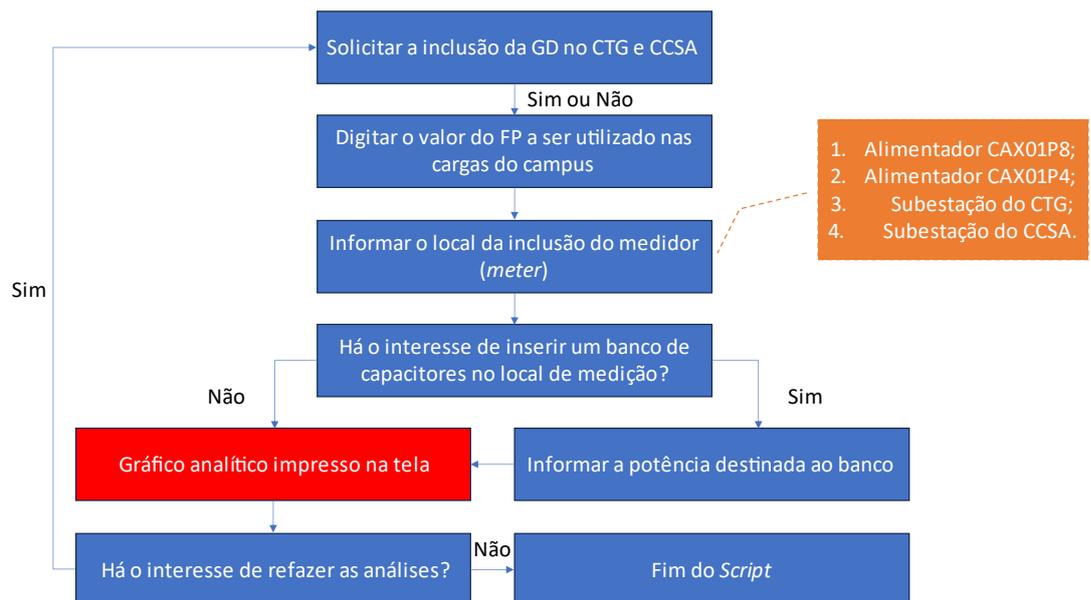
Nome	Data de modificação	Tipo	Tamanho
1-Principal	04/02/2024 21:24	Arquivo DSS	3 KB
1-Secundario	04/02/2024 21:23	Arquivo DSS	3 KB
2-Trafos	13/11/2023 09:12	Arquivo DSS	15 KB
3-Cargas	02/02/2024 21:01	Arquivo DSS	12 KB
3.1 - Cargas_Trafos	28/01/2024 20:22	Arquivo DSS	12 KB
3.2 - Cargas_Trafos_LoadShapes	08/02/2024 21:38	Arquivo DSS	13 KB
3.3 - Geradores_Trafos_LoadShapes	04/02/2024 19:09	Arquivo DSS	1 KB
4 - Linecodes	16/12/2023 22:46	Arquivo DSS	2 KB
5 - Linhas	28/01/2024 15:43	Arquivo DSS	19 KB

Fonte: Próprio autor.

### 3.5 Construção do arquivo de simulação no *Python*

Após a declaração de cada elemento de linha concluído, iniciou-se a construção do script principal do trabalho, denominado sugestivamente de *main*. O objetivo do arquivo executado através do IDE é fundamental para realizar a construção dos gráficos analíticos a respeito da qualidade energética utilizando o método *timeseries*, prezando a armazenagem e interpretação das informações pertinentes aos sinais elétricos do estudo em caráter diário. Após um certo tempo de construção e maturação das linhas de comando, o código chegou a uma qualidade significativamente considerável ao ponto de não haver mais a necessidade de abrir os arquivos de blocos de notas para realizar ajustes necessários para a simulação e nem mesmo o próprio aplicativo do *OpenDSS*. O *script* estará de acordo com o fluxograma da Figura 30, a depender do interesse de utilização do usuário:

Figura 30 – Fluxograma pretendido para o *script*.



Fonte: Próprio autor.

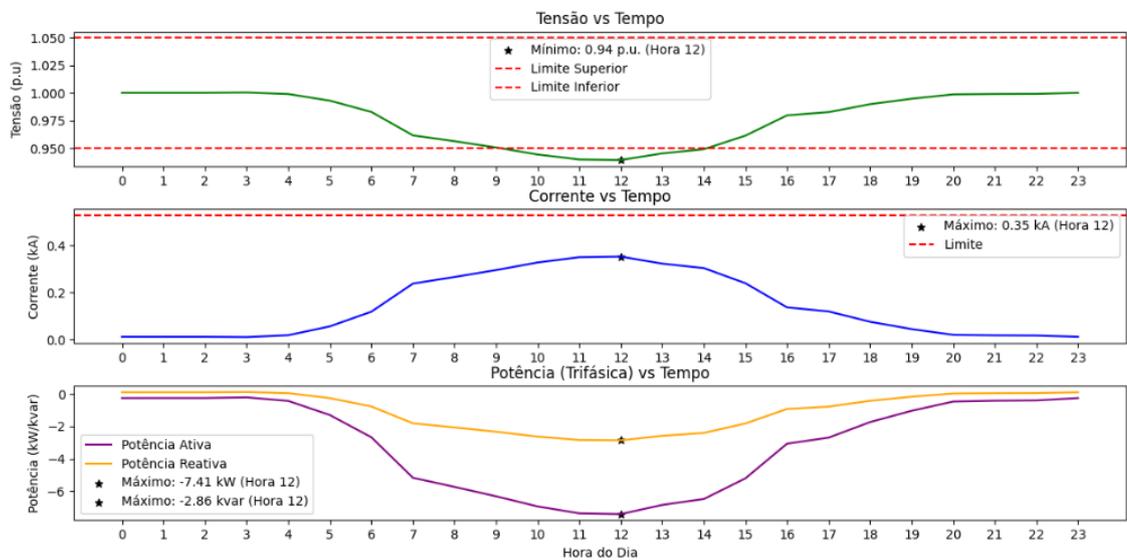
O objetivo é obter gráficos que mostrem a variação de tensão, corrente, potência ativa e reativa ao longo de um dia. Isso será feito usando dados de entrada escolhidos pelo usuário, conforme mostrado no fluxograma da Figura 30.

### 3.6 Resultados gráficos sem a inclusão de GD e sem compensação capacitiva

Progressivamente, a coleta dos resultados gráficos avaliativos para esta subseção estará de acordo em ordem cronológica para os seguintes pontos:

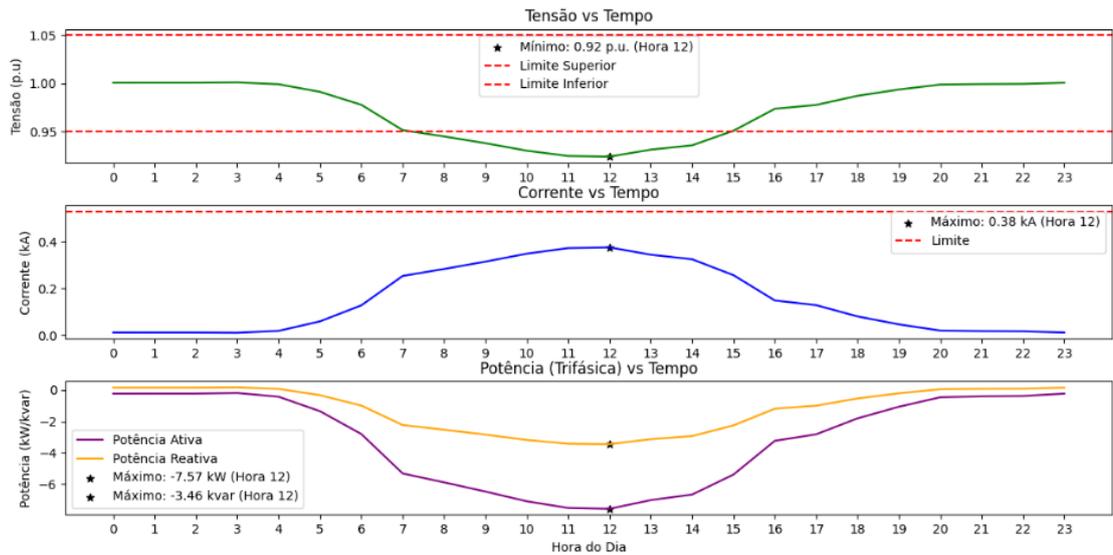
1. Alimentador CAX01P8 (via BR-101), visto na Figura 31;
2. Alimentador CAX01P4 (via Centro de Artes e Comunicações (CAC)), visto na Figura 32;
3. Entrada da subestação do CTG, visto na Figura 33;
4. Entrada da subestação do CCSA, visto na Figura 34.

Figura 31 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P8 sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e FP = 0,92.



Fonte: Próprio autor.

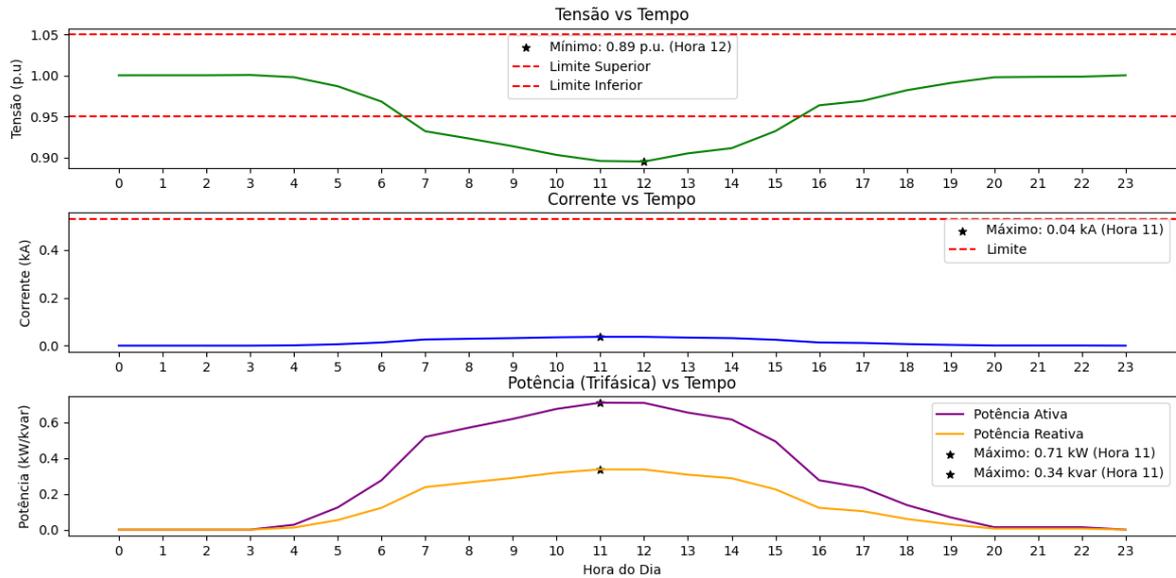
Figura 32 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P4 sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 0,92$ .



Fonte: Próprio autor.

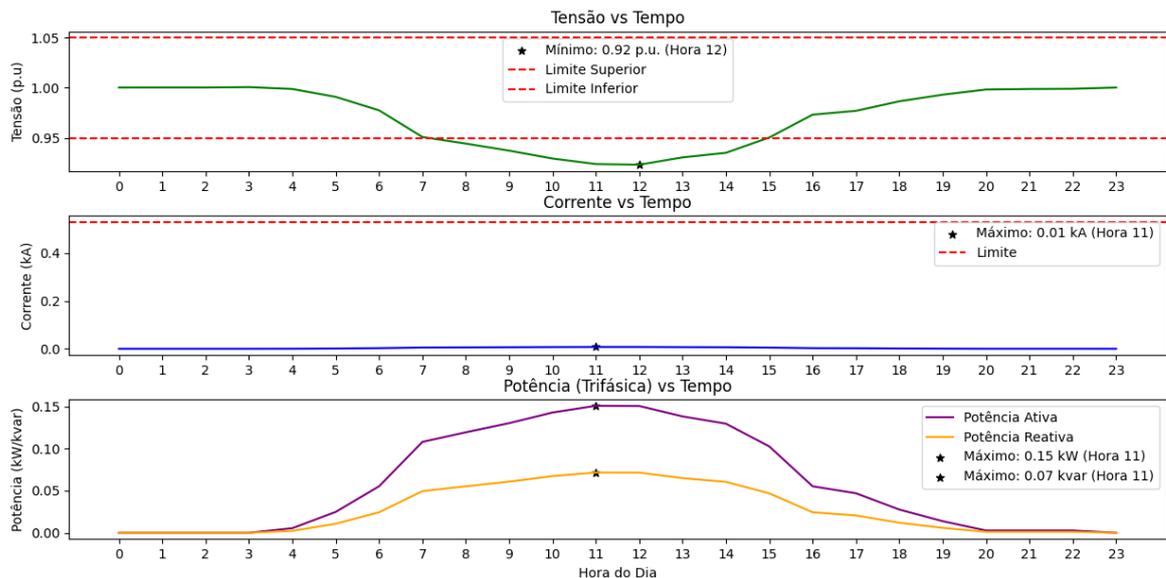
O condutor utilizado nos alimentadores CAX-01P8 (Figura 31) e CAX-01P4 (Figura 32) é o alumínio 4/0, os fabricantes informam que essa modalidade de condutor possui uma corrente nominal de 530 A [9] representada como limite tracejado vermelho na seção destinada à avaliação da corrente, mostrando que mesmo por volta do meio-dia no cenário previsto para a maior demanda de carga, o condutor suporta com folga os seus limites operacionais. Os sinais referentes às potências constam como negativos pois a arquitetura do *software* interpreta um fluxo de potência saindo dos terminais da linha de distribuição, no sentido da geração para a carga. Já a maior observação se dá na avaliação qualitativa dos valores de tensão evidenciados neste alimentador, principalmente entre o horário das 09:00 às 14:00 nos quais há um aumento progressivo da demanda de cargas para os centros de funcionamento majoritariamente para o turno integral, constatando um afundamento fora do limite inferior a 5% referente ao valor nominal (13,8 kv) segundo os critérios de qualidade documentados inclusive como sugestão para as simulações padrões do *OpenDSS* [11].

Figura 33 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CTG sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 0,92$ .



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CCSA sem a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 0,92$ .



Fonte: Próprio autor.

Já para o caso das subestações dos centros acadêmicos avaliados, isto é, o CTG (Figura 33) e o CCSA (Figura 34), o condutor utilizado é o alumínio 2 AWG, para tal condutor os fabricantes informam que sua corrente nominal é avaliada em 199 A [23], também representada como limite tracejado vermelho na seção

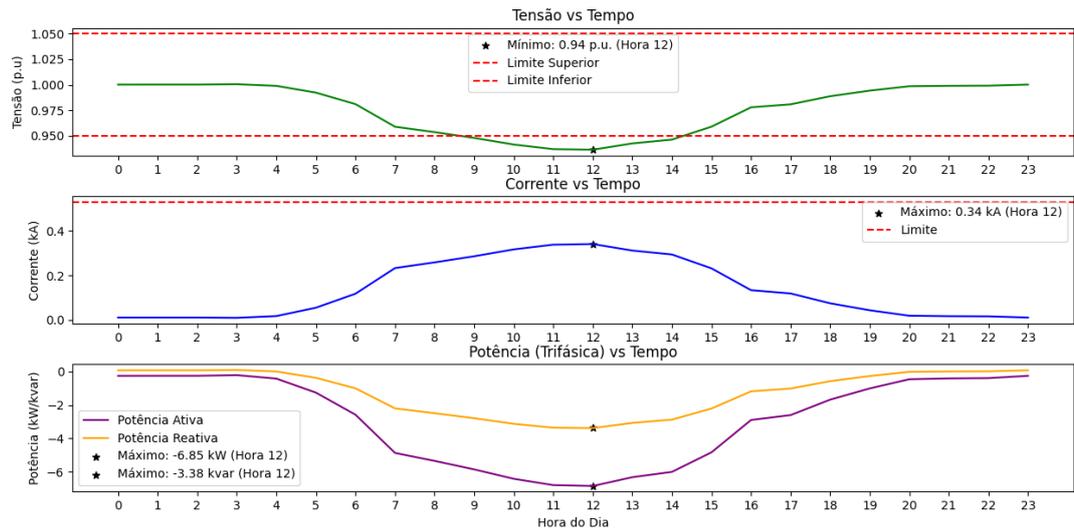
destinada à avaliação da corrente, mostrando que estes condutores por mais que ofereçam uma capacidade nominal de condição muito menor que os de 4/0, atendem as demandas de carga para os centros com folga em qualquer horário do dia. Os sinais referentes às potências constam como positivos pois a arquitetura do *software* interpreta um fluxo de potência entrando nos terminais da linha em conexão com os barramentos da subestação, no sentido da geração para a carga. Para as tensões, há uma evidência de distanciamento significativa para os limites toleráveis aos valores nominais (aproximadamente de 5%) durante um intervalo de quase oito horas em ambos os centros, sugerindo uma advertência importante para estudos de compensação de cargas a fim de evitar levar problemas às instalações locais.

### **3.7 Resultados gráficos com a inclusão de GD e sem compensação capacitiva**

A mesma ordem de coleta de resultados ocorreu para as linhas de distribuição vistas no subtópico anterior. Espera-se que a partir da inclusão dos blocos geradores, os valores de potência vistos pelas linhas de distribuição entregues às cargas possam diminuir, levando também a uma redução das magnitudes de corrente, principalmente a partir das análises das subestações em questão. A coleta dos resultados gráficos avaliativos para esta subseção estará de acordo em ordem cronológica para os seguintes pontos:

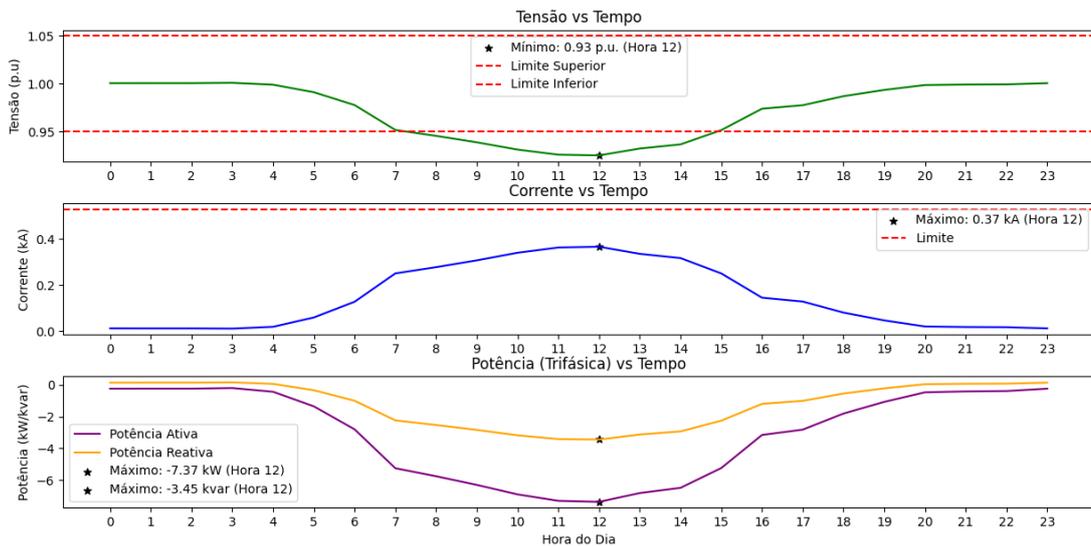
1. Alimentador CAX01P8 (via BR-101), visto na Figura 35;
2. Alimentador CAX01P4 (via Centro de Artes e Comunicações (CAC)), visto na Figura 36;
3. Entrada da subestação do CTG, visto na Figura 37;
4. Entrada da subestação do CCSA, visto na Figura 38.

Figura 35 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P8 com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 0,92$ .



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P4 com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 0,92$ .

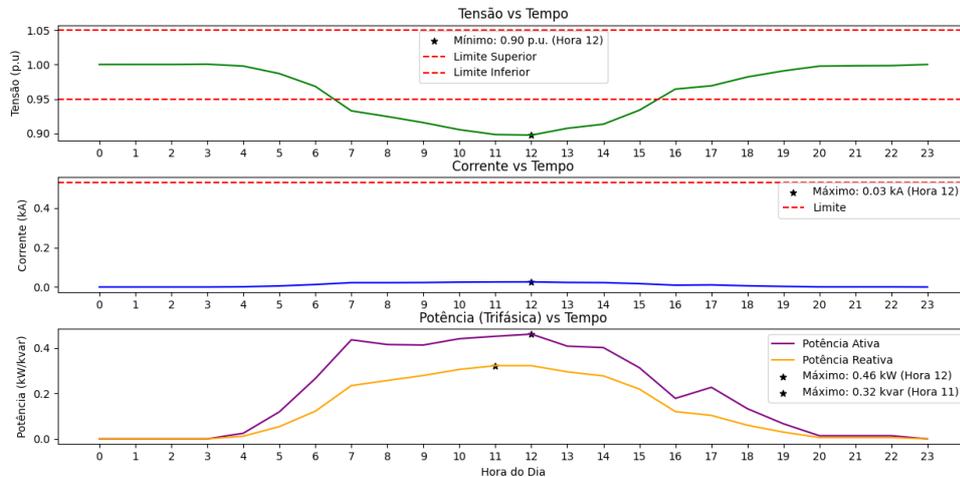


Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que pouco se altera ao ver as diferenças de magnitudes entre os valores de tensão registrados, pois para o CAX-01P8 (Figura 35) os valores permanecem o mesmo de 0,94 PU às 12:00h. Já no caso do CAX-01P4 (Figura 36), observa-se uma leve melhora com um valor superior a 0,01 PU, sendo o último valor registrado com 0,93 PU mais próximo dos padrões de qualidade da rede. Para o

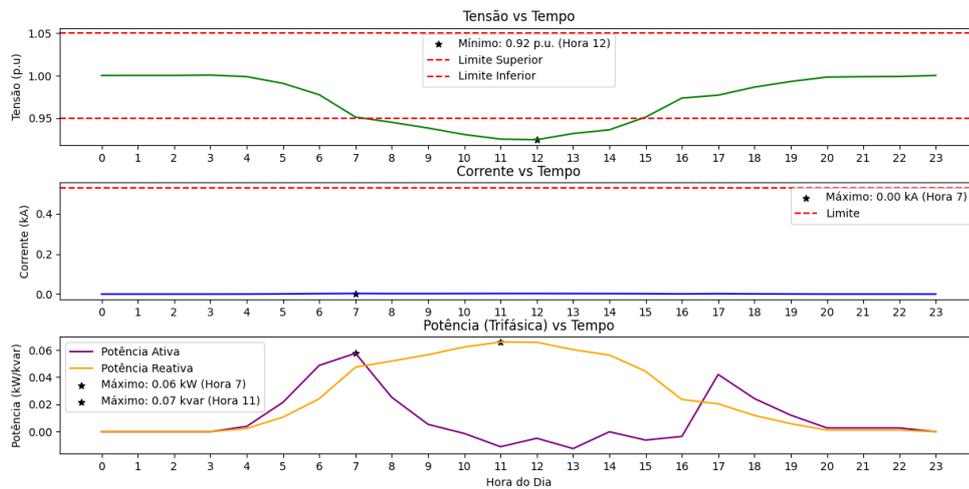
caso das correntes, houve uma redução na ordem de 10 A para ambos os alimentadores devido ao alívio de consumo ao inserir a GD na malha de distribuição.

Figura 37 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CTG com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 0,92$ .



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CCSA com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 0,92$ .



Fonte: Próprio autor.

Para essas avaliações mais voltadas às cargas, nota-se vários cenários interessantes. Os sinais de tensão permanecem inalterados no CTG (Figura 37). Já para o CCSA (Figura 38), uma leve melhora no sinal de 0,01 PU foi registrada. Mas

fica evidente o poder da inclusão dos módulos de geração na subestação do CCSA, pois ao fazer uma comparação entre os centros, verifica-se que por mais que as magnitudes das potências consumidas reduzam consideravelmente no CTG, ainda assim haverá um comportamento contínuo para um comportamento de consumidor de potência nesse centro. Já no CCSA avalia-se um intervalo de possível reversão entre um bloco consumidor um bloco gerador entre os horários das 08:00 às 16:00 quando o bloco passa exportar o excedente de geração para o restante da rede da UFPE. Pode parecer que o resultado do valor de corrente seja incongruente, mas a magnitude máxima registrado no intervalo se deu na ordem dos 8 A, sendo difícil de ser visualizado pela distância ao valor limite referente à capacidade operacional do condutor 2 AWG de alumínio.

### **3.8 Compensações passivas visando mitigar os afundamentos de tensão**

Vislumbrando um ajuste a fim de mitigar os sinais de afundamento de tensão vistos em todos os cenários estudados dentre os resultados, propôs-se a aplicação de duas vertentes envolvendo o incremento de elementos capacitivos. A primeira vertente envolve a aplicação de bancos de capacitores na entrada dos dois alimentadores do campus junto aos seus respectivos medidores, visando a observação do comportamento de tensão a níveis mais apropriados. A segunda vertente envolverá a variação do fator de potência diretamente nas cargas acopladas aos barramentos secundários das subestações do campus. Isso envolve a emulação de um ajuste de compensação reativa direta e a determinação de um ajuste automático de bancos de capacitores vinculados às cargas. Os resultados são extraídos para o CTG e o CCSA. Deve-se levar em conta que essa modalidade de correção se dá em caráter individual. Portanto, aplicá-la diretamente em todos os centros universitários pode ser muito oneroso financeiramente falando.

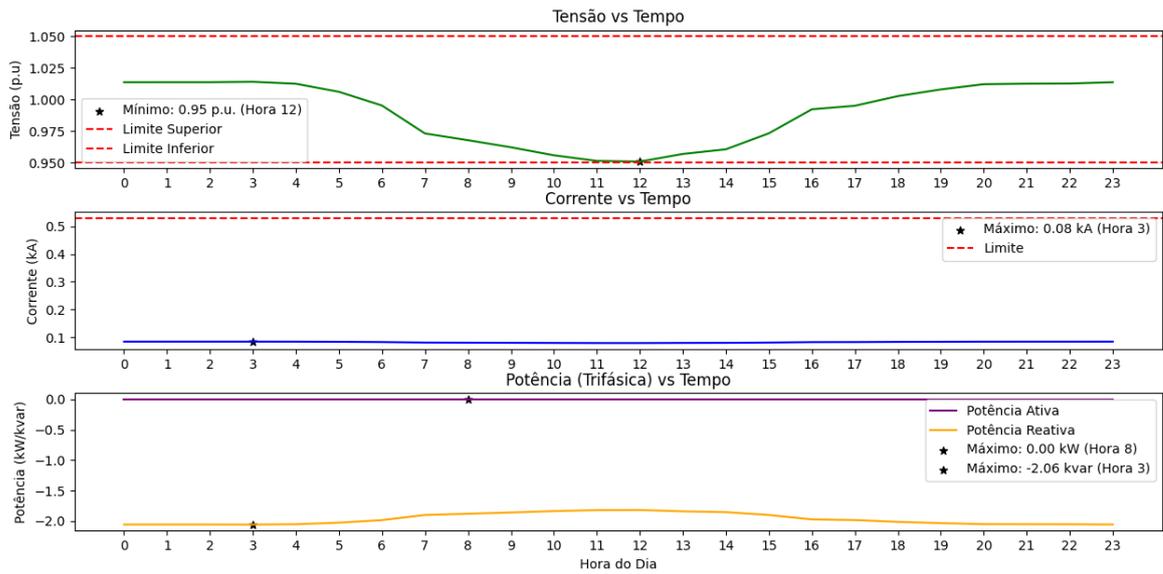
A coleta dos resultados gráficos avaliativos para esta subseção estará de acordo em ordem cronológica para os seguintes pontos:

1. Alimentador CAX01P8 (via BR-101), visto na Figura 39;
2. Alimentador CAX01P4 (via Centro de Artes e Comunicações (CAC)), visto na Figura 39;

3. Entrada da subestação do CTG, visto na Figura 40;
4. Entrada da subestação do CCSA, visto na Figura 41.

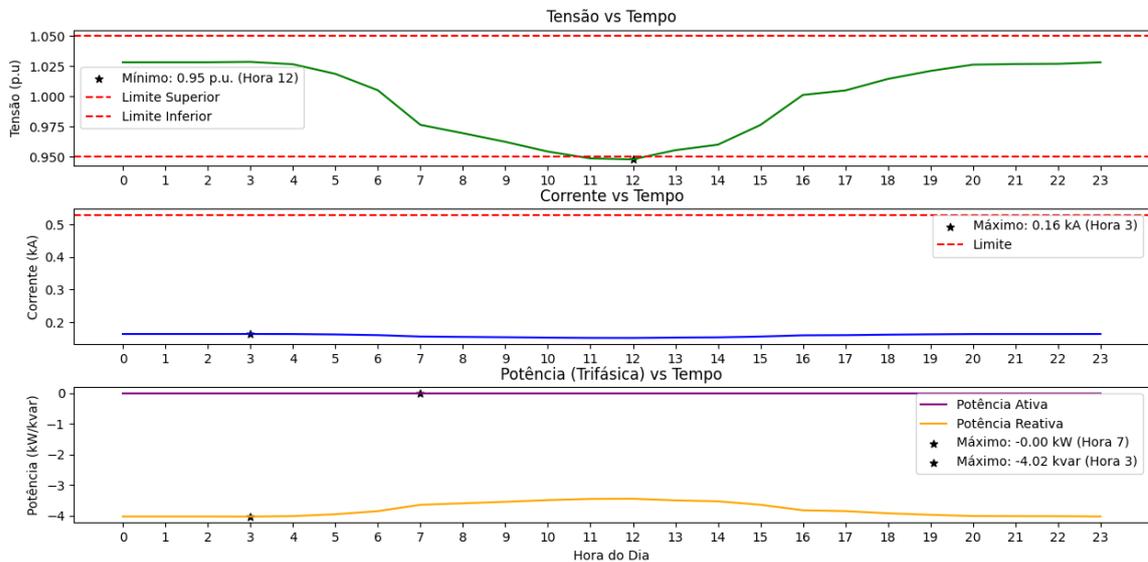
### 3.8.1 Bancos de capacitores acoplados à jusante dos medidores

Figura 39 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P8 com a inclusão da GD, com a inclusão de um banco de capacitores de 2000 kvar's e FP = 0,92.



Fonte: Próprio autor.

Figura 40– Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do alimentador CAX-01P4 com a inclusão da GD, com a inclusão de um banco de capacitores de 3800 kvar's e FP = 0,92.

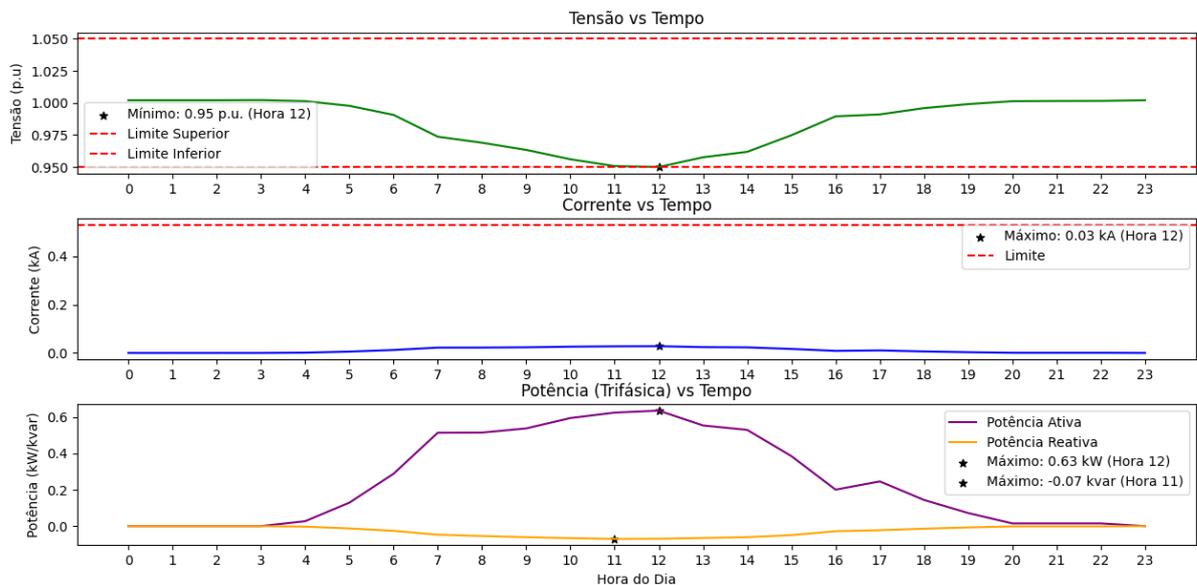


Fonte: Próprio autor.

Os resultados avaliados vistos pelo medidor vinculado ao CAX-01P8 (Figura 39) e CAX-01P4 (Figura 40) se basearam na estimativa de aplicação de bancos de capacitores à jusante da instalação do medidor nas linhas de distribuição pelo critério de tentativa e erro, cedendo uma avaliação da necessidade de inclusão de capacitores acima dos 2 Mvar's a fim de ajustar os valores de tensão para os limites mínimos apropriados de qualidade de fornecimento.

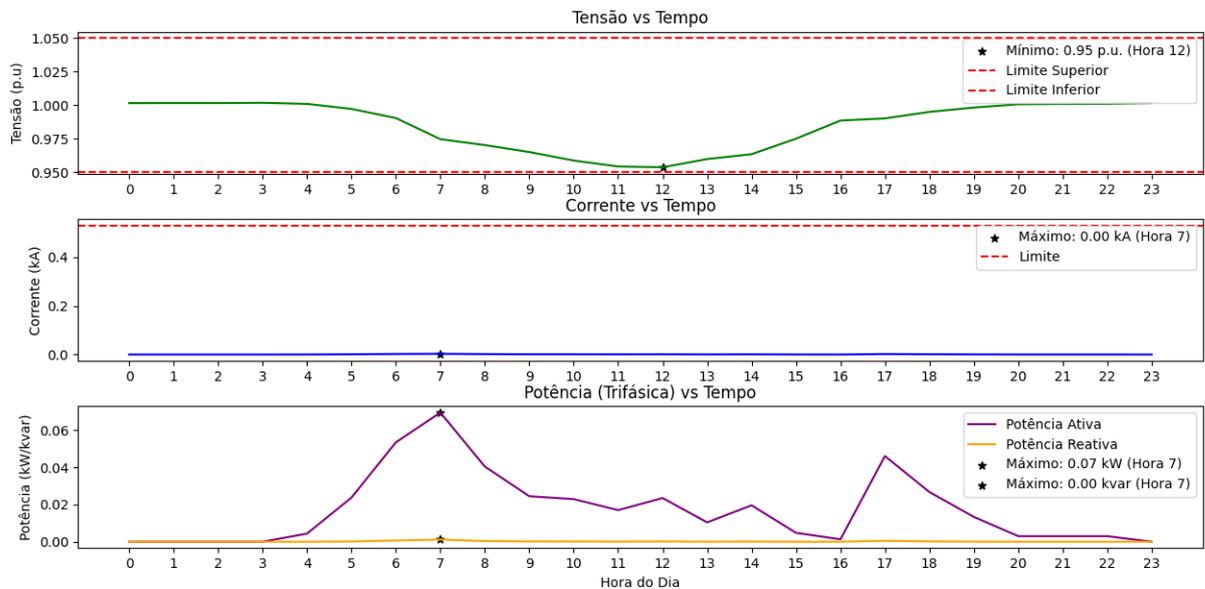
### 3.8.2 Ajuste automático de FP nos terminais das subestações

Figura 41 – Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CTG com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = -0,993$



Fonte: Próprio autor

Figura 42– Resultado diário do fluxo de carga aplicado na entrada do subestação do CCSA com a inclusão da GD, sem a inclusão de um banco de capacitores e  $FP = 1,00$



Fonte: Próprio autor

Ao tratar a respeito da visualização dos sinais vistos pelo medidor vinculado ao CTG (Figura 41) e CCSA (Figura 42), percebe-se, portanto, que ajustes individuais a partir de implementações de bancos de capacitores automatizados cuja função seja a de ajustar o nível de potência nos barramentos das subestações pode ser uma estratégia razoável, levando em conta que a observação para as subestações dos referidos centros acadêmicos resultou em valores de fatores de potência toleráveis aos limites reativos solicitados pela ANEEL [24].

## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Deve-se ter em mente que o trabalho foi iniciado a fim de realizar a construção de um modelo iterável e convergente para estudos elétricos da malha de distribuição para o Campus Recife da UFPE, este objetivo foi alcançado, tendo ainda o acréscimo de uma série de incrementos envolvendo facilidades de controles dos elementos envolvidos em todo o sistema envolvendo comandos de interesse ao usuário a partir da comunicação com códigos em linguagem *Python*. Apresentaram-se os impactos da inserção da GD a qual trouxe um alívio de carga, diminuição da corrente fornecida pelos condutores e menores valores para o afundamento de tensão visto pelos medidores.

Também ofereceram propostas envolvendo compensações reativas por meio da inserção de banco de capacitores em prol de um ajuste dos valores mínimos de tensão vistos nas linhas em análise. Estes a nível teórico trouxeram resultados satisfatórios já que as correções dos valores de tensão envolvendo o atendimento dos limites mínimos qualitativos para esta grandeza e os limites máximos de fator de potência regulados a nível nacional levaram ao objetivo almejado. Porém, não coube a esse trabalho avaliar as aplicações técnicas e econômicas envolvendo a aquisição e instalação dos elementos capacitivos e os dispositivos de manobra necessários para as suas operações. Fora a necessidade do estudo envolvendo os fenômenos transitórios envolvendo as referidas manobras.

Visto, portanto, que o modelo apesar de ser muito bem fundamentado, pode-se realizar algumas melhorias a fim de que os resultados estejam mais fidedignos à realidade do campus, tais como:

- Cálculo das capacitâncias *shunt* de cada trechos de condutores avaliados a partir das características elétricas de cada condutor e as suas geometrias particulares.
- Realizar a mudança de simulações entre os dois elementos *circuit* e *vsource*, isto é, pôr o *circuit* no CAX-01P4 e o *vsource* no CAX-01P8.
- Obtenção das curvas de cargas particulares para cada centro acadêmico a fim de tornar os consumos mais assertivos para cada horário distinto nas diferentes análises do método *timeseries*.

- Desenvolvimento de um laço no *script* do *Python* visando a busca automática do melhor valor de potência necessário para que o bloco de elemento passivo (podendo ser capacitor ou não) realize a correção dos limites de tensão apropriados segundo os critérios qualitativos necessários para a rede.
- Aprimoramento para o *script* para que ele possa realizar uma escolha de qualquer elemento da rede além dos elementos *lines* vistos no estudo. Como sugestão, pode-se utilizar um elemento *monitor* além do elemento *meter* visto no estudo, pois o *meter* demonstrou uma limitação para registrar informações elétricas para elementos PQ.
- Estudar e inserir as informações pertinentes aos trechos em baixa tensão dentre as linhas do campus.

## REFERÊNCIAS

1. ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico. Resultados da Operação. Qualidade do Suprimento. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>>. Acesso em: 25 de Março de 2024.
2. ITAIPÚ BINACIONAL. Pergunta Frequentes. Disponível em: <[https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes#:~:text=3.,700%20megawatts%20\(MW\)%20cada](https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes#:~:text=3.,700%20megawatts%20(MW)%20cada)>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
3. Belo Monte: Gigante por Natureza. Disponível em: <<https://www.nortteenergiasa.com.br/uhe-belo-monte/>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
4. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Micro e Minigeração Distribuída & Baterias. Rio de Janeiro: EPE, p.7, Janeiro de 2023.
5. GRAINGER, John J. ; JR., Wuliam D. Stevenson. **Power System Analysis**, v. 1, p. 195-373. Singapura: McGraw-Hill, Janeiro de 1994.
6. IEEE 3000 STANDARDS COLLECTION. IEEE 3002 STANDARDS: Nova Iorque: IEEE, p.11, Setembro de 2018.
7. PETEEL. **Fluxo de Potência em Sistemas Elétricos**. Disponível em: <<https://peteel.ufsc.br/2020/07/27/fluxo-de-potencia/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%3F,tens%C3%A3o%20em%20todas%20as%20barras>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
8. PRONEXT ENGENHARIA. **Estudo de Fluxo de Potência**. Disponível em: <<https://pronextengenharia.com.br/estudo-de-fluxo-de-potencia/>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
9. GLOVER, J. Duncan ; S. Sarma, Mulukutla; J.Overbye, Thomas. **Power System: Analysis and Design**, v. 5, p. 326-817. Stamford: Cengage Learning. Janeiro de 2010.
10. EPRI. **What is OpenDSS**. Disponível em: <<https://www.epri.com/pages/sa/opensdss>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
11. DUGAN, Roger C.; MONTENEGRO, Davis. Reference Guide.**The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)**: Palo Alto: EPRI, pg 242, Março de 2016.
12. De Freitas, Paulo Ricardo Radatz. **Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software OpenDSS**. São Paulo, p. 85-87. 2015.
13. DAVIS, T. A.; NATARAJAN, E. P. Algorithm 907: **Klu, a direct sparse solver for circuit simulation problems**. **ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)**, 2010. ACM, v. 37, n. 3, p. 1, 2010.
14. pypi.org: py-dss-interface 2.0.2. Disponível em: <<https://pypi.org/project/py-dss-interface/>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
15. Python Software Foundation. Python. Disponível em: <<https://www.python.org/downloads/>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
16. JetBrains: Pycharm Professional, The Python IDE for Professional Developers.

- Disponível em: <<https://www.jetbrains.com/pycharm/download/?section=windows>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
17. Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist). Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
  18. ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<https://dadosabertos-aneel.opendata.arcgis.com/explore?tags=dist>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
  19. QGIS: Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto. Disponível em: <[https://qgis.org/pt\\_BR/site/](https://qgis.org/pt_BR/site/)>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
  20. ANEEL: Base de Dados Geográfica da Distribuidora - BDGD. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/base-de-dados-geografica-da-distribuidora-bdgd>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2024.
  21. STAVE II: 330W~345W, 5BB-Polycrystalline PV Module. Haining City, p.1, Janeiro de 2018.
  22. Silva, B. A., R.; Barbosa, E. M., S., 2023. **INSERÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR NA MATRIZ ENERGÉTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO** . Congresso Nacional de Iniciação Científica, CONIC, 2023.
  23. Corfio: Fios e cabos elétricos. Disponível em: <<https://www.corfio.com.br/pt/produto/cabo-de-aluminio-nu-ca>>. Acesso em: 10/02/2024.
  24. ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica, Seção VIII, Do Fator de Potência e do Reativo Excedente, Art. 302 . Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acesso em: 13 de Fevereiro de 2024.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – CÓDIGO PRINCIPAL CONSTANDO GD NO OPENDSS

clear

!Equivalente de Thevenin PDE 1, Alimentador CAX-01P8

new circuit.EqTheveninUFPE1

~ basekv=13.8 pu=1.000 phases=3 bus1=Barra135

~ Isc3=4004.12 ISC1=2459.57 ! Potências de curto-circuito estimadas no barramento B057360

~ x1r1=3.642 x0r0=6.005

!Fonte de tensão do PDE 2, Alimentador CAX-01P4

new vsource.EqTheveninUFPE2

~ basekv=13.8 pu=1.000 phases=3 bus1=Barra160

~ Isc3=4107.45 Isc1=2419.19 ! Potências de curto-circuito estimadas no barramento B055389

~ x1r1=3.373 x0r0=5.200

//Transformadores (Delta-Estrela Aterrados), deve-se apenas utilizá-los apenas quando houver o interesse de incluir as cargas conectadas aos mesmos no arquivo (3.1 - Cargas (Com Trafos).dss

compile [2 - Trafos.DSS]

//LOADS (SEs Aéreas e Abridadas) conectadas em delta, potência constante e FP definido pelo usuário.

compile [3.2 - Cargas\_Trafos\_LoadShapes.DSS]

//Módulos de Geração MGD FP=1,00

compile [3.3 - Geradores\_Trafos\_LoadShapes.DSS]

//CAPCITORES em delta

```

New capacitor.cap1 phases=3 bus1=Barra105 kvar=150 kv=13.8 conn=delta
New capacitor.cap2 phases=3 bus1=Barra162 kvar=150 kv=13.8 conn=delta
New capacitor.cap3 phases=3 bus1=Barra161 kvar=150 kv=13.8 conn=delta
// New capacitor.cap4 phases=3 bus1=Barra163 kvar=150 kv=13.8 (Este banco foi
desativado após alguns estudos realizados no local).

```

### !LINE CODES

```

// Linecodes para cada trecho de material condutor diferente
// O modelo adotado para a linha será o curto pelas dimensões serem inferiores a 80
km, desprezando-se os efeitos das capacitâncias.
compile [4 - Linecodes.DSS]

```

### !LINES

```

// Serão segmentados cada trecho seguidamente de acordo com os linecodes.
compile [5 - Linhas.DSS]

```

```
Set controlmode=Static
```

```
Set mode=Daily
```

```
Set stepsize=1h
```

```
Set number=1
```

```
Set hour=0
```

```
Set voltagebases="13.8 .38"
```

```
calc voltagebases
```

```

// Medidores (Estes foram comentados a fim de possibilitar uma melhor iteração no
script do Python)

```

```
//New energymeter.medidorCAX01P4 element=Line.Linha106 terminal=2
```

```
//New energymeter.medidorCAX01P8 element=Line.Linha75 terminal=1
```

```
//New energymeter.medidorCTG element=Line.Linha137 terminal=1
```

```
//A barra 162 foi eliminada já que a mesma já se consolidava como a barra 57
```

## APÊNDICE B – *SCRIPT* NO PYTHON PARA O CONTROLE DO OPENDSS

```

import py_dss_interface
import os
import pathlib
import matplotlib.pyplot as plt
import codecs
from math import sqrt

#Variável para possibilitar a continuidade do script!
recomeçar = "S"

while recomeçar == "S":

    MMGD = str(input("Incluir GD na simulação? [S/N]: ")).upper().strip()[0]

    #Linhas de comando envolvendo a inclusão ou não de Geração Distribuída na
    rede.
    if MMGD == "S":
        script_path = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
        dss_file = pathlib.Path(script_path).joinpath("REDEUFPE", "1- Principal.dss")

        dss = py_dss_interface.DSS()
        dss.text("clear")
        dss.text(f"compile [{dss_file}]")

    else:
        script_path = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
        dss_file = pathlib.Path(script_path).joinpath("REDEUFPE", "1- Secundario.dss")

        dss = py_dss_interface.DSS()
        dss.text("clear")
        dss.text(f"compile [{dss_file}]")

```

# Linhas de comando envolvendo o fator de potência (FP) a ser utilizado no estudo.

```
with open(r"C:\Ambiente Virtual (Python_DSS)\REDEUFPE\UltimoFP.txt", "r") as
arquivo:
```

```
    FP1 = arquivo.read()
```

```
    print(f'O último backup de fator de potência atual é o: {FP1}.')
```

```
Continuar = str(input("Deseja reutilizar o valor de FP? [S/N]: ")).upper().strip()[0]
```

```
if Continuar == "S":
```

```
    print(f"Utilizando o valor de FP como {FP1} ...")
```

```
else:
```

```
    FP2 = float(input("Digite o FP a ser utilizado na simulação: "))
```

```
    with open(r"C:\Ambiente Virtual (Python_DSS)\REDEUFPE\UltimoFP.txt", "w")
as arquivo:
```

```
        arquivo.write(str(FP2))
```

```
# Substituição dos FP's da UFPE
```

```
filename = r"C:\Ambiente Virtual (Python_DSS)\REDEUFPE\3.2 -
Cargas_Trafos_LoadShapes.dss"
```

```
# Fator de Potência a ser substituído
```

```
novο_fator_potencia = FP2
```

```
# Codificação do arquivo para os caracteres em pt-br
```

```
file_encoding = "utf-8"
```

```
# Ler o conteúdo do arquivo
```

```
with codecs.open(filename, 'r', encoding=file_encoding) as file:
```

```
    file_content = file.read()
```

```
# Substituir o fator de potência antigo pelo novo
new_file_content = file_content.replace(str(FP1), f"{novo_fator_potencia}")
```

```
# Escrever o conteúdo de volta ao arquivo
with codecs.open(filename, 'w', encoding=file_encoding) as file:
    file.write(new_file_content)
```

```
print("Substituição concluída para os valores de FP.")
```

#Seção destinada à escolha do usuário para os pontos de medição a serem observados.

```
Opção = 0
```

```
while Opção != 1 or Opção != 2 or Opção != 3:
```

```
    print("[1]: Alimentador CAX01P8, entrada via BR-101, Linha 75 no OpenDSS;")
```

```
    print("[2]: Alimentador CAX01P4, entrada via CAC, Linha 106 no OpenDSS;")
```

```
    print("[3]: SE CTG, Linha 137 no OpenDSS.")
```

```
    print("[4]: SE CCSA, Linha 25 no OpenDSS.")
```

#Laços referentes à escolha do local de medição a ser estudado:

```
    Opção = int(input("Selecione uma opção válida de medidor a ser visto na
simulação: "))
```

```
    if Opção == 1:
```

```
        dss.text("New      energymeter.medidorCAX01P8      element=Line.Linha75
terminal=2")
```

```
        dss.circuit.set_active_element("line.Linha75")
```

```
        linha = "line.Linha75"
```

```
        bus = "Barra135"
```

```
        break
```

```
    elif Opção == 2:
```

```

        dss.text("New energymeter.medidorCAX01P8 element=Line.Linha106
terminal=1")
        dss.circuit.set_active_element("line.Linha106")
        linha = "line.Linha106"
        bus = "Barra161"
        break

elif Opção == 3:
    dss.text("New energymeter.medidorCTG element=Line.Linha137 terminal=1")
    #A SE do CTG c/ MMGD está conectada à Barra 90 (Com 1500 kva)
    dss.circuit.set_active_element("line.Linha137")
    linha = "line.Linha137"
    bus = "Barra58"
    break

elif Opção == 4:
    dss.text("New energymeter.medidorCCSA element=Line.Linha25
terminal=1") #A SE do CCSA c/ MMGD está conectada à Barra 90 (Com 300 kva)
    dss.circuit.set_active_element("line.Linha25")
    linha = "line.Linha25"
    bus = "Barra181"
    break

#Inclusão optativa para um banco de capacitores no elemento escolhido!
Escolha_BCap = str(input("Deseja Incluir um banco de capacitor no elemento
informado? [S/N]: ")).upper().strip()[0]

if Escolha_BCap == 'S':
    Pot_Capacitor = str(input("Informe a potência do banco (em kvar) para o banco
de capacitores: ")).strip()
    dss.text(f"New capacitor.{linha} phases=3 bus1={bus} kvar={Pot_Capacitor}
kv=13.8 conn=delta")

```

# Seção destinada a armazenar as grandezas elétricas horárias a serem plotadas nos gráficos diários.

```
Tensões = []
```

```
Correntes = []
```

```
P_Ativas = []
```

```
P_Reativas = []
```

```
hora = []
```

# Variáveis para armazenar os valores máximos e os respectivos horários

```
tensao_min, corrent_max, pot_ativa_max, pot_reat_max = 1, 0, 0, 0
```

```
horario_min_tensao,    horario_maxima_corrente,    horario_maxima_pot_ativa,
horario_maxima_pot_reat = 0, 0, 0, 0
```

```
for hour in range(24):
```

```
    dss.text("solve")
```

```
    hora.append(hour)
```

# Tensões de linha por fase em p.u (considerando apenas uma fase para simplificar)

```
Va = (dss.cktelement.voltages[0] * sqrt(3)) / 13800
```

```
Tensões.append(Va)
```

# Correntes nodais por fase em kA (considerando apenas uma fase para simplificar)

```
Ia = dss.cktelement.currents_mag_ang[0] / 1000
```

```
Correntes.append(Ia)
```

# Potência ativa total na linha em kW

```
Pa = 3 * (dss.cktelement.powers[0]) / 1000
```

```
P_Ativas.append(Pa)
```

# Potência reativa total em kvar

```

Qa = 3 * (dss.cktelement.powers[1]) / 1000
P_Reativas.append(Qa)

# Atualizar os valores máximos e os respectivos horários
if Va < tensao_min:
    tensao_min = Va
    horario_min_tensao = hour

if Ia > corrent_max:
    corrent_max = Ia
    horario_maxima_corrente = hour

if abs(Pa) > abs(pot_ativa_max):
    pot_ativa_max = Pa
    horario_maxima_pot_ativa = hour

if abs(Qa) > abs(pot_reat_max):
    pot_reat_max = Qa
    horario_maxima_pot_reat = hour

# Plotar os gráficos com os marcadores
plt.figure(figsize=(10, 8))

# Subplot 1 > Gráfico Tensões em p.u vs hora.
plt.subplot(3, 1, 1)
plt.plot(hora, Tensões, color="green")
plt.scatter(horario_min_tensao, tensao_min, color='black', marker='*',
label=f'Mínimo: {tensao_min:.2f} p.u. (Hora {horario_min_tensao})')
plt.axhline(y=1.05, color='red', linestyle='--', label='Limite Superior')
plt.axhline(y=0.95, color='red', linestyle='--', label='Limite Inferior')
plt.title('Tensão vs Tempo')
plt.ylabel('Tensão (p.u)')
plt.legend()

```

```

plt.xticks(range(0, 24, 1))

# Subplot 2 > Gráfico Correntes em Ampères vs hora.
plt.subplot(3, 1, 2)
plt.plot(hora, Correntes, c='blue')
plt.scatter(horario_maxima_corrente, corrent_max, color='black', marker='*',
label=f'Máximo: {corrent_max:.2f} kA (Hora {horario_maxima_corrente})')
plt.axhline(y=0.53, color='red', linestyle='--', label='Limite')
plt.title('Corrente vs Tempo')
plt.ylabel('Corrente (kA)')
plt.legend()
plt.xticks(range(0, 24, 1))

# Subplot 3 > Gráfico Potências em kW/kvar vs hora.
plt.subplot(3, 1, 3)
plt.plot(hora, P_Ativas, c="purple", label='Potência Ativa')
plt.plot(hora, P_Reativas, c="orange", label='Potência Reativa')
plt.scatter(horario_maxima_pot_ativa, pot_ativa_max, color='black', marker='*',
label=f'Máximo: {pot_ativa_max:.2f} kW (Hora {horario_maxima_pot_ativa})')
plt.scatter(horario_maxima_pot_reat, pot_reat_max, color='black', marker='*',
label=f'Máximo: {pot_reat_max:.2f} kvar (Hora {horario_maxima_pot_reat})')
plt.title('Potência (Trifásica) vs Tempo')
plt.ylabel('Potência (kW/kvar)')
plt.xlabel('Hora do Dia')
plt.legend()
plt.xticks(range(0, 24, 1))

plt.tight_layout()
plt.show()
recomeçar = str(input("Deseja recomeçar o processo?[S/N]: ")).upper().strip()[0]

print('Processo finalizado')

```