INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARLON DA SILVA CARNEIRO

UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE* OPENDSS PARA CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

FLORIANÓPOLIS, 2019.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARLON DA SILVA CARNEIRO

UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE* OPENDSS PARA CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Edison A. C. Aranha Neto, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Carneiro, Marlon da Silva
UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE OPENDSS PARA CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO / Marlon da Silva Carneiro ; orientação de Edison Antonio Cardoso Aranha Neto. - Florianópolis, SC, 2019.
130 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. OpenDSS. 2. Sistema de Distribuição. 3. Tutorial. 4. Geração Distribuída . I. Cardoso Aranha Neto, Edison Antonio . II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica. III. Título.

UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE* OPENDSS PARA CÁLCULO DAS PERDAS TÉCNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

MARLON DA SILVA CARNEIRO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de dezembro de 2019.

Banca Examinadora:

Prof. Edison A. C. Aranha Neto, D.Eng.

Prof. Daniel Tenfen, D.Eng.

Prof. Everthon Taghori Sica, D.Eng.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força e sabedoria para perseverar diante das dificuldades, agradeço a Ele tudo que sou e tenho.

Agradeço também duas pessoas que amo, minha mãe, Maria Damiana e minha esposa Claudia Miranda, obrigado pela grande ajuda, tenho certeza que sem vocês nada disso seria realizado.

Sou grato a Instituição Federal de Santa Catarina e ao corpo docente que fizeram parte da minha formação, principalmente ao meu orientador Edison A. C. Aranha que me ajudou a desenvolver e melhorar este presente trabalho. Ao professor Rubipiara C. Fernandes por ter me dado a oportunidade de realizar o estágio obrigatório e pôr em prática a parte do curso voltado para legislação de Geração Distribuída e microrredes.

Aos meus amigos e colegas que conheci durante o curso de graduação e que fizeram parte da minha história.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de apresentar o *software* de simulação OpenDSS e desenvolver um tutorial com a finalidade de facilitar a compreensão de estudante e profissionais, com ênfase no estudo das Perdas Técnicas. Com o aumento da complexidade nas redes de distribuição através da inserção da Geração Distribuída (GD) no sistema, é de suma importância a utilização de ferramentas que auxiliem o profissional a tomar medidas corretas relativas ao desempenho presente e futuro nas redes de distribuição. O uso do *software* OpenDSS como ferramenta promove melhorias, principalmente com a sua capacidade de lidar com redes que apresentam unidades de GD e com o de fluxo de potência ao longo de um período determinado.

Palavras-chave: OpenDSS. Geração Distribuída. Fluxo de Potência. Perdas Técnicas.

ABSTRACT

This work aims to present the OpenDSS simulation software and to develop a tutorial capable of facilitating student and professional understanding, with emphasis on the study of Technical Losses. As the complexity of the distribution networks increases through the insertion of the Distributed Generation (DG) into the system, it is extremely important to use tools that help the professional to take correct measures regarding present and future performance in the distribution network. The use of OpenDSS software as a tool has brought improvements, especially with its ability to deal with networks that have DG units and performance of power flow over a given period.

Keywords: OpenDSS. Distributed generation. Power Flow. Technical Losses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do Software OpenDSS 18
Figura 2 - Definição de Barra 21
Figura 3 - Definição de Terminal 22
Figura 4 - Elemento de Conversão de Energia 22
Figura 5 - Elemento de Transporte de Energia 23
Figura 6 - Linha trifásica a 3 fios 40
Figura 7 - Diagrama de bloco do modelo de um sistema fotovoltaica 46
Figura 8 – Diagrama unifilar de um sistema hipotético do estudo de caso 52
Figura 9 – Potência fornecida pela subestação 53
Figura 10 – Tensão no barramento da subestação 54
Figura 11 – Dados Energy Meter 54
Figura 12 – Potência ativa fornecida pelo gerador eólico 55
Figura 13 – Potência ativa fornecida pelo gerador fotovoltaico 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros básicos da barra swing 23
Tabela 2 - Parâmetros básicos da *Line* 28
Tabela 3 - Parâmetros básicos da *Linecode* 30
Tabela 4 - Parâmetros básicos do *Transformer* 31
Tabela 5 - Parâmetros básicos do *Regcontrol* 35
Tabela 6 - Principais modelos de carga 36
Tabela 7 – Parâmetros do elemento *Load* 37
Tabela 8 – Parâmetro do elemento *Capacitor* 39
Tabela 9 - Parâmetro básicos do elemento PVSystem 41
Tabela 10 - Parâmetro do gerador eólico Tipo I 43
Tabela 11 - Dados das Cargas 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

COM – *Component Object Model*

CRTP – Ciclo de Revisões Tarifárias Periódicas

EPRI – *Electric Power Research Institute*

GD – Geração Distribuída

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEP – *Impedance Equivalent Loss*

PCH – Pequenas Centrais Hidroelétricas

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 Justificativa 11
1.2 Definição do Problema 11
1.3 Objetivos 12
1.3.1 Objetivo Geral 12
1.3.2 Objetivos Específicos 12
1.4 Estrutura do trabalho 12

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
2.1 Perdas Técnicas e Não Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica 14
2.2 Geração Distribuída 15
2.3 O *Software* OpenDSS 17
2.3.1 Utilização do *Software* OpenDSS no contexto da GD 19

3 MODELOS BÁSICOS PARA DEFINIÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS NO *SOFTWARE* OPENDSS 21
3.1 Modelos de Barramentos 21
3.2 Modelos de Terminais 21
3.3 Modelo de Elemento de Conversão de Energia 22
3.4 Modelo de Elemento de Transporte de Energia 22
3.5 Comandos Utilizados no *Software* OpenDSS para Definição dos Elementos 23
3.5.1 Comando *New Circuit* 23
3.5.2 Comando *New Line* 25
3.5.2.1 Sistema Desequilibrado 25
3.5.2.2 Sistema Equilibrado 26
3.5.2.3 Parâmetros da Linha 28
3.5.3 Comando *New Linecode* 29
3.5.4 Comando *New Transformer* 31
3.5.4.1 Transformador trifásico de 2 enrolamentos delta-estrela aterrado 32
3.5.4.2 Transformador trifásico de 3 enrolamentos 32
3.5.4.3 Transformador monofásico de 2 enrolamentos 33
3.5.4.4 Banco trifásico com 3 transformadores monofásico 34
3.5.5 Comando *New Regcontrol* 35
3.5.6 Comando New Load 36
3.5.7 Comando *New Capacitor* 38
3.6 Modelo de um Sistema Fotovoltaico no OpenDSS 39
3.7 Modelo de um Sistema Eólico no OpenDSS 42
3.7.1 Gerador Tipo I 43
3.7.2 Gerador Tipo II 44
3.7.3 Gerador Tipo III 44

4 ESTUDO DE CASO 46
4.1 Apresentação do sistema hipotético 46
4.2 Modelagem do sistema 47
4.2.1 Modelagem do alimentador 47
4.2.2 Modelagem das linhas de distribuição 48
4.2.3 Modelagem dos Transformadores 49

4.2.4 Modelagem do Banco de Capacitores 49
4.2.5 Modelagem das Cargas 49
4.2.6 Modelagem do Gerador Fotovoltaico no OpenDSS 50
4.2.7 Modelagem do Gerador Eólico no OpenDSS.....51
4.3 Principais Resultados da Simulação.....52
5 CONCLUSÃO 56
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros 57
REFERÊNCIAS.....58
APÊNDICE – MANUAL DE USO DO SOFTWARE OPENDSS 61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O Sistema Elétrico de Potência é constituído basicamente de geradores, transmissão, distribuição e o centro de carga. Esse sistema tem como finalidade transformar um tipo de energia (hidráulica, vento, calor etc.) em energia elétrica, tendo como finalidade o fornecimento da energia necessária para os consumidores.

No Brasil, a conversão de energia hidráulica em energia elétrica é a mais utilizada, e o fato dessas usinas hidrelétricas estarem afastadas dos grandes centros de consumo leva a necessidade de se implementar uma grande rede para que seja realizado o transporte de energia (MACHADO, 2017).

Dentro dessa grande rede há o ambiente de distribuição de energia, que tem a missão de fornecer energia elétrica aos consumidores residenciais, industriais e comerciais, e que passou a ser cercado de uma rigidez na qualidade, continuidade e eficiência dos serviços, e fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (CARVALHO, 2014).

Neste contexto de melhoramento e qualidade de energia, as concessionárias monitoram o sistema pelo qual são responsáveis e verificam os níveis de tensão e perdas técnicas na rede elétrica. As perdas técnicas são extremamente importantes, pois elas podem gerar multas as distribuidoras, além de representar desperdícios em energia e consequentemente a diminuição da receita da empresa. Desta forma as concessionárias buscam fornecer uma energia elétrica de melhor qualidade com menor perdas dentro das especificações da ANEEL.

1.2 Definição do Problema

Em busca da melhoria e da diminuição das perdas técnicas, as concessionárias, por uma exigência da ANEEL desde junho de 2014, estão utilizando a ferramenta computacional OpenDSS (*Open Distribution System Simulator*) para a simulação de redes de distribuição e cálculo das perdas técnicas.

A partir da necessidade de estudos mais aprofundados nas redes de distribuição, este trabalho visa explorar e apresentar um tutorial do *software* OpenDSS e pesquisar as colaborações e possibilidades desta ferramenta relacionado ao sistema de distribuição.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho tem por objetivo apresentar o *software* de simulação OpenDSS e desenvolver um tutorial didático com as suas principais funcionalidades em forma de um manual de usuário para facilitar a compreensão dos estudantes e especialistas, principalmente relacionado ao cálculo das perdas no sistema de distribuição.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pode-se alçar:

a) Coletar e estudar na literatura existente a teoria referente ao tema e realizar a inclusão dessas informações;

b) Selecionar dentro do estudo ao *software* as funções mais utilizadas e recomendadas pela ANEEL para análise e diagnóstico da rede de distribuição;

c) Estruturar e organizar de forma didática o conteúdo selecionado, tendo em vista facilitar a compreensão;

d) Desenvolver um manual com instruções do *software* OpenDSS, proporcionando o entendimento das funcionalidades da ferramenta; e

e) Identificar algumas dificuldades encontradas e propor possíveis melhorias.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em quatro capítulos e um apêndice, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 1, apresenta-se um contexto geral sobre o sistema elétrico brasileiro que vem sofrendo por mudança, devido principalmente a inserção de

geração distribuída na rede, e a preocupação das distribuidoras em reduzir as perdas técnicas no sistema.

No Capítulo 2 é mostrada a utilização do *software* OpenDSS no contexto de geração distribuída e como o uso do mesmo ajudará a avaliar os impactos e diminuir possíveis perdas técnicas no sistema de distribuição. Ainda neste capítulo é apresentado um resumo histórico do *software* OpenDSS com sua principal motivação de criação. É apresentado também sua estrutura, interface e tipo de linguagem de máquina.

O Capítulo 3 é dedicado em apresentar um modelo básico para definição dos equipamentos elétricos no *software* OpenDSS.

No Capítulo 4 são apresentadas a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, no Apêndice A é apresentado o tutorial do *software* OpenDSS com suas principais funcionalidades para simulação de um sistema de distribuição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Perdas Técnicas e Não Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

O acréscimo nos custos na rede de distribuição devido ao aumento das perdas técnicas desperta os especialistas a melhorarem seus conhecimentos a respeito do sistema elétrico de potência (SEP). As regras que definem o cálculo das perdas técnicas estão indicadas no Módulo 7 do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. De maneira geral, o cálculo destas perdas é feito com informações simplificadas das redes e equipamentos existentes, como por exemplo, potência dos transformadores, bitola e comprimento dos condutores e dados de consumo da carga (ANEEL, 2019).

Neste cenário, estes profissionais podem utilizar as informações de várias maneiras para redução das perdas técnicas no sistema de distribuição e algumas delas podem ser expostas: implementação de bancos de capacitores, recondutoramento, reconfiguração da rede, gestão das cargas (OLIVEIRA, 2016). A partir de 2015, com o início do 4° Ciclo de Revisões Tarifárias Periódicas (CRTP), novos regulamentos foram elaborados, e as perdas técnicas passaram a ser calculadas por uma metodologia específica de fluxo de carga, chamada de método de injeção de corrente nodais, criado para redes radias do sistema de distribuição (BAROUCHE, 2017). Neste contexto de novos regulamentos, por recomendação da ANEEL, as distribuidoras estão utilizando o *software* livre OpenDSS, que realiza a análise do funcionamento de sistemas reais de distribuição de energia diante de alguns aspectos específicos como: estudo dos níveis de tensão nas barras do sistema, perdas nas linhas e transformadores e recondutoramento do sistema após um aumento na demanda.

Barouche (2017) apresenta uma análise comparativa e algumas ideias de metodologias de cálculo de perdas técnicas. O autor realiza um estudo e dois principais tópicos são abordados no trabalho, o cálculo de fluxo de carga do *software* OpenDSS, baseado no método de injeção de correntes nodais e os cálculos das perdas técnicas dos segmentos de rede como transformadores de potência, medidores de energia, reguladores de tensão, etc. No modelo de fluxo de cargas é

apresentado um estudo de como são feitas a alocação das cargas devido às perdas não técnicas com a parametrização do modelo da carga e implementação de um algoritmo alternativo. Por meio de dados coletados através de medição de campo foram feitas simulações no OpenDSS com o objetivo de realizar análise comparativas entre os modelos propostos para avaliação das perdas técnicas. Em suma, este trabalho contém uma modelagem individual de diversos equipamentos residenciais e aplicação de um algoritmo para análise de sensibilidade da carga por meio de diferentes cenários.

Paye (2018) expõe um pensamento inovador para cálculo de perdas, sendo este novo conceito chamado de Impedância Equivalente de Perdas (IEP), reconhecido por calcular com relativa precisão as perdas técnicas e não técnicas em redes de distribuição de energia de modo prático e econômico. O método utiliza de dados disponibilizado pela concessionária como: correntes e potência na saída da subestação, contas de energia dos clientes e parâmetros elétricos da rede. Para realizar o estudo o autor realizou simulações com várias maneiras de operação com o *software* OpenDSS em sistemas elétricos testes do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) com 13 e 27 barras na presença de um gerador fotovoltaico. A ideia do método é mostrar que o mesmo pode ser utilizado pelas empresas de distribuição para ajudar os engenheiros no gerenciamento, monitoramento e planejamento de ações de redução de perdas futuras, considerando a separação das perdas técnicas e não técnicas.

2.2 Geração Distribuída

Com a mudança de paradigma no setor elétrico ocasionada pelo aumento de demanda, associada a dificuldade de construir grandes usinas de geração, tornou-se necessário a restruturação do sistema elétrico, trazendo novos desafios e possibilitando a construção e operação de geradores em paralelo com a rede de distribuição, trata-se da Geração Distribuída (GD).

A GD constitui-se na geração de energia elétrica de forma autônoma em níveis de tensão igual à do sistema de distribuição no qual o mesmo está conectado, geralmente próxima aos consumidores finais.

A geração quando bem planejada e operada e realizada próxima ao centro de carga torna o sistema mais confiável e estável, pois mantém a tensão utilizada em níveis adequados e possibilita uma diminuição de sobrecarga e de congestionamento do sistema.

No Brasil, em 2004, foi promulgada a Lei 10.848/04 que dispõe sobre comercialização de energia elétrica, onde a GD é mencionada, e desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa da ANEEL n° 482/2012, atualizada pela na Resolução Normativa n° 687 de 2015, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, e pode fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua região. Esta forma de geração ficou conhecida como Micro (geração inferior à 75 kW) e Minigeração (geração superior à 75 kW e menor ou igual a 5 MW) distribuídas de energia elétrica. A prática aos incentivos a GD é importante pois, pode beneficiar de maneira significativa o sistema (ANEEL, 2015).

A energia vinda de uma GD normalmente é proveniente de fontes renováveis ou incentivada pelo governo para estimular a expansão de geradores como: PCH (Pequenas Centrais Hidroelétricas), Biomassa, Eólica e Solar.

A inserção de GD na rede de distribuição podem apresentar as seguintes vantagens (NARUTO, 2017):

- Redução de perdas – redução da sobre carga das linhas de transmissão, reduzem-se perdas pelo chamado efeito joule, que afeta a geração convencional;
- Economia de investimentos em transmissão – redução em investimentos em novos cabos e diminuição da manutenção dos já existentes;
- Agilidades ao atender a demanda – a geração distribuída demanda menos complexidade tanto na liberação como no licenciamento para implantação de projetos, além de precisa de prazos menores para sua devida instalação;
- *Net Metering* – quando a energia elétrica gerada pelo sistema de GD for superior à utilizada em determinado mês, o consumidor acumula

créditos em sua conta de luz que podem ser utilizados em suas próximas faturas.

Apesar de todas as vantagens apresentadas, a GD pode acarretar em algumas desvantagens para o sistema:

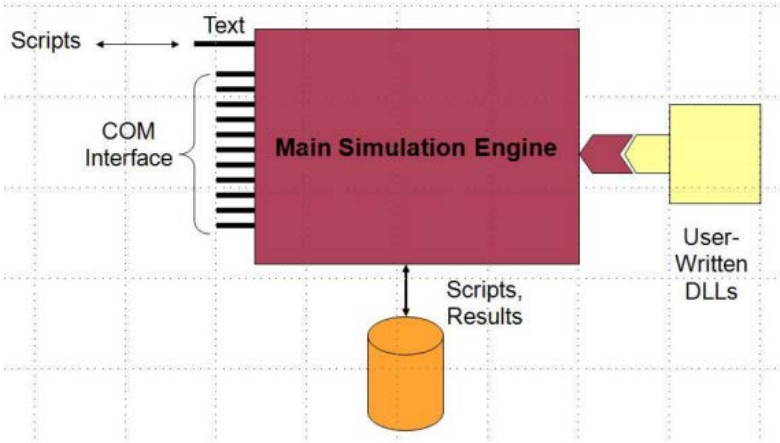
- Aumento da complexidade de operação da rede, pois muitas vezes o fluxo de energia pode ser bidirecional;
- A tensão pode apresentar dificuldades em ser controlada, pois em período de carga leve, a distorção harmônica na rede é aumentada e os níveis de curto-circuito da rede são alterados; e
- Geralmente as fontes de GD são tipos de geração intermitente, ocorrendo interrupções não esperadas na quantidade da fonte primária (radiação solar, vento, água), influenciando diretamente a geração elétrica.

2.3 O *Software* OpenDSS

O desenvolvimento do *software* OpenDSS iniciou em 1997 na *Electrotek Concepts*, Inc. por Roger Dungan e Thomas McDermott. Em 2004 foi comprado pela EPRI *Solutions* e, em 2008, tornou-se um programa de código aberto, chamado de OpenDSS. A análise de sistemas com Geração Distribuída (GD) foi o fator motivador de desenvolvimento desta ferramenta, porém se destaca que devido aos novos conceitos dos sistemas *Smart Grids* (Redes Inteligentes) novas funcionalidades foram desenvolvidas cujas características tornam o OpenDSS uma ferramenta versátil para simulações no ambiente da distribuição de energia (SILVA JUNIOR, 2010).

O *software* OpenDSS, em resumo, é estruturado como apresentado na Figura 1, tendo como objetivo criar uma ferramenta cuja interface fosse acessível a todos os níveis de usuário diminuindo as dificuldades de estudos realizáveis, havendo a possibilidade de usuários de nível avançado realizar interfaces a outros programas.

Figura 1 - Estrutura do Software OpenDSS



Fonte: Dugan (2013).

O programa é baseado em linhas de comandos que podem ser provenientes do usuário, de um arquivo de texto ou programa externos, ou seja, os elementos podem ser definidos utilizando as linhas de comandos do próprio *software* ou importando de um arquivo de texto.

A estrutura do OpenDSS que define os dados, os elementos dos circuitos e a interface foram desenvolvidos na linguagem orientada à objetos Pascal e as funções para soluções e cálculos através das matrizes esparsas foram escritas nas linguagens C e C++.

O *software* permite aos programadores utilizar a interface *Component Object Model* (COM) da *Microsoft* e com isso desenvolver e executar novas soluções personalizadas através de programas externos. A interface pode ser controlada de forma autônima de qualquer banco de dados ou arquivo de texto fixo que caracteriza um circuito. Programas como MATLAB (*MATrix LABoratory*), *Python*, etc., podem controlar o OpenDSS, e algumas ferramentas do Microsoft Office para auxiliar o programador podem ser utilizadas (FREITAS, 2015).

A forma de realizar a codificação é através de *scripts* de comando, local onde o usuário pode utilizar os programas adequados à cada circuito a ser simulado. Dugan (2018) destaca que esta solução atende a maioria dos usuários que utilizam o OpenDSS.

2.3.1 Utilização do *Software* OpenDSS no contexto da GD

Ribeiro Junior (2018) busca apresentar os impactos que a geração distribuída pode acarretar a todos os envolvidos no sistema de distribuição, principalmente com a inserção de sistemas fotovoltaicos distribuídos. Para amenizar alguns destes impactos na rede de distribuição, é usados inversores inteligentes e algumas de suas funções que atuam na regulação de grandezas elétricas. Desta forma, a fim de mensurar o desempenho da geração distribuída na rede e atuação dos inversores inteligentes, são realizadas simulações através do *software* OpenDSS. A simulação e a apresentação dos resultados levam em consideração três possíveis cenários: quando não há inserção de geração distribuída fotovoltaico, com introdução do sistema fotovoltaico e por último com a adição das funções inteligentes. O autor coloca que o *software* OpenDSS ajudará à avaliar os impactos, e consequentemente a diminuir os problemas causados no sistema de distribuição.

Pode-se destacar outra pesquisa, elaborada por Eichkoff (2018), que tem como objetivo fazer uma análise da GD para o controle de tensão e potência reativa em sistemas modernos de distribuição. O crescimento das conexões de GD às redes de distribuição tem ocasionado um aumento da dificuldade de operação do sistema, gerando problemas com os níveis de tensão, controle de potência reativa e comprometendo a vida útil dos condutores elétricos. A solução apresentada pelo autor consiste em realizar o controle de tensão de e potência reativa a partir de um inversor de frequência, onde o mesmo auxilia a regulação de tensão através da introdução ou retirada da potência reativa do sistema de distribuição. Neste contexto foram realizados testes no sistema IEEE 13 barras no *software* OpenDSS, realizando comparações dos níveis de tensão e de fator de potência para uma determinada quantidade de GD na rede para diferentes condições operacionais do inversor de frequência.

O trabalho de Ribeiro (2018) mostra um estudo do impacto da intermitência dos sistemas fotovoltaicos na regulação de tensão, como a intermitência desta geração pode provocar variações no nível de tensão devido as variações de irradiação e temperatura solar durante o dia. Em contrapartida, quando estes geradores são instalados próximos aos centros de cargas eles podem contribuir para regulação de tensão e diminuição da demanda de potência fornecida pela subestação. Desta

maneira, para realizar os estudos e verificar como estes geradores impactam na regulação de tensão, foram realizados testes com o sistema IEEE 34 barras com o auxílio do *software* OpenDSS em diferentes cenários de irradiância e perfil de carga residencial e industrial.

3 MODELOS BÁSICOS PARA DEFINIÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS NO *SOFTWARE* OPENDSS

Neste capítulo serão apresentados os modelos básicos para definição das redes elétricas.

3.1 Modelos de Barramentos

Um barramento é um elemento de circuito que possui nós como mostrado na Figura 2. Em cada nó do barramento é conectado um elemento (linhas, capacitores, transformadores, etc.) do circuito. Umas das principais característica das barras é apresentar suas tensões nodais em relação ao potencial zero, que é o nó de referência.

Figura 10 - Definição de Barra

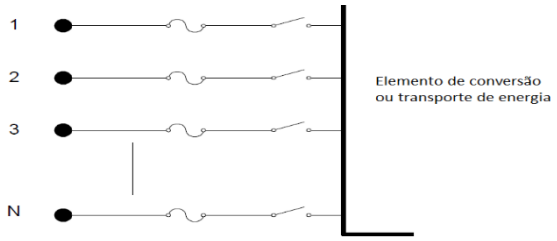
Fonte: EPRI (2019).

3.2 Modelos de Terminais

No *software* OpenDSS os equipamentos ou elementos elétricos de um sistema de distribuição quando modelados possuem um ou mais terminais que podem ter vários conectores. Os terminais dos elementos só podem ser conectados a uma única barra.

A Figura 3 apresenta o exemplo de um elemento com os seus terminais.

Figura 19 - Definição de Terminal



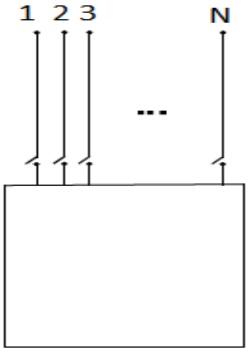
Fonte: EPRI (2019).

3.3 Modelo de Elemento de Conversão de Energia

Estes elementos convertem energia elétrica em outra forma de energia e vice-versa, como mostrado na Figura 4 e basicamente são:

- Geradores de energia;
- Carga;
- Acumuladores de Energia; e
- Equivalentes de Thévenin.

Figura 28 - Elemento de Conversão de Energia



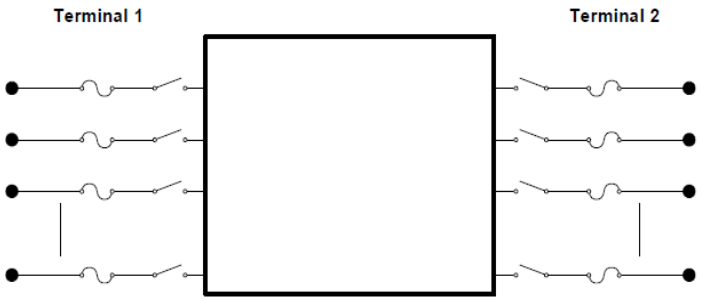
Fonte: DUGAN (2019).

3.4 Modelo de Elemento de Transporte de Energia

Na Figura 5 é apresentado um exemplo de elemento que tem por função transportar energia de um lado a outro do circuito, e geralmente possuem um ou mais terminais, por exemplo:

- Linhas de Distribuição;
- Transformador;
- Banco de Capacitores; e
- Regulador.

Figura 35 - Elemento de Transporte de Energia



Fonte: EPRI (2019).

3.5 Comandos Utilizados no *Software* OpenDSS para Definição dos Elementos

3.5.1 Comando *New Circuit*

Todo sistema de distribuição representado no OpenDSS deve ser inicializado com o comando *New Circuit,* que deve representar o equivalente da subestação, ou seja, todo circuito que configura a transmissão pode ser visto pela subestação como um equivalente de Thévenin. Este elemento possui apenas um terminal e pode ser considerado como uma barra *swing.*

Os parâmetros necessários para definir a barra *swing* está na Tabela 1

Tabela 1 - Parâmetros básicos da barra swing

Parâmetro	Descrição
Base kV	Tensão de linha nominal em kV

Bus1	Nome da barra que o terminal está conectado
pu	Valor por unidade nos barramentos
Phases	Número de fases
R1(Ω)	Resistência de sequência positiva da fonte
X1(Ω)	Reatância de sequência positiva da fonte
mvasc3(MVA)	Potência de curto-circuito trifásico
mvasc1(MVA)	Potência de curto-circuito monofásico

Fonte: Elaboração própria (2019).

Logo abaixo é apresentado um exemplo do código utilizado no OpenDSS para a barra *swing* ou saída do alimentador.

```
New Circuit.Subestação  basekV=13.8  Bus1=100  phases=3   mvasc3=3000   mvasc1=3000
```

No código tem-se:

- Um *New Circuit* definido como nome de subestação;
- Conexão à barra 100;
- Tensão nominal de 13,8 kV;
- Sistema trifásico a três fios; e
- Potência de curto-circuito trifásico de 3000 MVA e potência de curto-circuito monofásico de 3000 MVA.

Existe a opção de declaração da resistência (R1) e reatância (X1) de sequência positiva na ausência das potências de curto-circuito, como apresentado logo abaixo.

```
New Circuit.Subestação   basekV=13.8  Bus1=100  phases=3  R1=0.01 X1=0.05
```

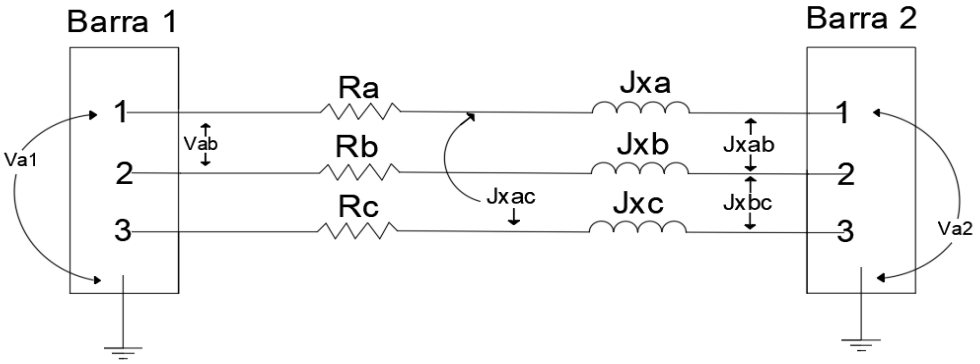
3.5.2 Comando *New Line*

As linhas são elementos de transporte de energia com dois terminais e são caracterizadas por uma impedância, que podem ser modeladas diretamente no comando *New Line,* por meio de componentes simétricos se o sistema for equilibrado, porém se o sistema é desequilibrado utiliza-se a forma matricial de impedâncias.

3.5.2.1 Sistema Desequilibrado

Na Figura 6 é apresentada uma linha a 3 fios com suas impedâncias próprias e mútuas de um sistema equilibrado.

Figura 6 - Linha trifásica a 3 fios



Fonte: Elaboração própria (2019).

Obs. Para linhas equilibrado as reatâncias mútuas e próprias são iguais (Jxa = Jxb = Jxc , Jxab = Jxbc = Jxac), para linhas desequilibrada as mesmas são diferentes.

A tensão entre o barramento 1 e o barramento 2 é dada pelas equações 1, 2 e 3 abaixo:

$$\Delta Va = Va1 - Va2 = (Ra + Jxa)*Ia + Jxab*Ib + Jxac*Ic \quad (1)$$

$$\Delta Vb = Vb1 - Vb2 = (Rb + Jxb)*Ib + Jxab*Ia + Jxbc*Ic \quad (2)$$

$$\Delta Vc = Vc1 - Vc2 = (Rc + Jxc)*Ic + Jxbc*Ib + Jxac*Ia \quad (3)$$

Na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta Va \\ \Delta Vb \\ \Delta Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ra + Jxa & Jxab & Jxac \\ Jxab & Rb + Jxb & Jxbc \\ Jxac & Jxac & Rc + Jxc \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \qquad (4)$$

Separando a resistência da reatância:

$$Z=R+JX=\begin{bmatrix} Ra & 0 & 0 \\ 0 & Rb & 0 \\ 0 & 0 & Rc \end{bmatrix} + J \begin{bmatrix} xa & xab & xac \\ xab & xb & xbc \\ xac & xbc & xc \end{bmatrix} \qquad (5)$$

O *software* necessita da parte triangular inferior da matriz para descrever a linha, como pode ser visto em destaque na cor vermelha na matriz abaixo.

$$Z=R+JX=\begin{bmatrix} Ra & 0 & 0 \\ 0 & Rb & 0 \\ 0 & 0 & Rc \end{bmatrix} + J \begin{bmatrix} xa & xab & xac \\ xab & xb & xbc \\ xac & xbc & xc \end{bmatrix} \qquad (6)$$

No OpenDSS fica da seguinte forma:

Rmatrix = [Ra | 0 Rb | 0 0 Rc]

Xmatrix = [xa | xab xb | xac xbc xc]

3.5.2.2 Sistema Equilibrado

Para um sistema equilibrado as impedâncias próprias e mútuas são iguais como pode ser visto na equação 5 e 6 respectivamente:

Zp = (Ra+Jxa) = (Rb+Jxb) = (Rc+Jxc) → Impedância própria (7)

Zm = JXab = JXac = JXbc → Impedância mútua (8)

Na forma matricial fica:

$$Z = \begin{bmatrix} Zp & Zm & Zm \\ Zm & Zp & Zm \\ Zm & Zm & Zp \end{bmatrix} \quad (9)$$

Utilizando os componentes simétricos tem-se:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Z_{012} = Z.A \quad (11)$$

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Zp & Zm & Zm \\ Zm & Zp & Zm \\ Zm & Zm & Zp \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Zp + 2Zm & 0 & 0 \\ Zm & Zp - Zm & Zm \\ 0 & 0 & Zp - Zm \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde:

$Zp + 2Zm \rightarrow Z_0$ - Elemento de Sequência zero

$Zp - Zm \rightarrow Z_1$ - Elemento de Sequência positiva

$Zp - Zm \rightarrow Z_2$ - Elemento de Sequência negativa

O usuário deve entregar ao OpenDSS os elementos de sequência positiva e zero como nas equações 14 e 15, respectivamente:

$$Z_0 = R_0 + JX_0 \quad (14)$$

$$Z_1 = R_1 + JX1 \quad (15)$$

3.5.2.3 Parâmetros da Linha

Os parâmetros necessários para definir a *Line* estão apresentados na Tabela 2

Tabela 2 - Parâmetros básicos da *Line*

Parâmetro	Descrição
Phases	Número de fases
Bus1	Nome da barra que o terminal 1 está conectado
Bus2	Nome da barra que o terminal 2 está conectado
R1(Ω)	Resistência de sequência positiva por unidade de distância
R0(Ω)	Resistência de sequência zero por unidade de distância
X1(Ω)	Reatância de sequência positiva por unidade de distância
X0(Ω)	Reatância de sequência zero por unidade de distância
Rmatrix	Matriz de resistência da linha por unidade de distância
Xmatrix	Matriz de reatância da linha por unidade de distância
C1(nF)	Capacitância total de sequência positiva por unidade de distância
C0(nF)	Capacitância total de sequência zero por unidade de distância
Length	Comprimento da Linha
Units	Unidade de medida de comprimento

Fonte: Elaboração própria (2019).

Logo abaixo é apresentado um exemplo do código de uma linha equilibrada utilizado no OpenDSS para o elemento *Line*. O símbolo “~” permite a continuação do comando na linha seguinte.

```
New Line.Linha1   Phases=3   bus1=100  bus2=200  Length=1  Units=km
~R1=0.06  X1=0.12  R0=0.18  X0=0.40    ! ohm/km
~C1=3  C0=1                            ! nF/km
```

No código tem-se:

- Uma *New Line* definida com o nome de Linha1;
- Terminal 1 conectado à barra 100;
- Terminal 2 conectado à barra 200;
- Comprimento da Linha de 1 quilômetro;
- Unidade de comprimento em quilômetro;
- Valores de R1 e R0 - resistência de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, respectivamente;
- Valores de X1 e X0 - reatância de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, respectivamente; e
- Valores de C1 e C0 - capacitância total de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, respectivamente.

3.5.3 Comando *New Linecode*

O comando ‘’*New Linecode’’* geralmente é utilizado quando o sistema de tem várias linhas com as mesmas característica elétricas. Pode-se armazenar as impedâncias em um único objeto ‘’*Linecode*’’, e quando a linha for especificada, o comando busca as informações da linha contida no “*Linecode*”. Desta forma, o algoritmo fica organizado facilitando a leitura do mesmo.

Os parâmetros necessários para definir a *Linecode* estão na Tabela 3.

Abaixo é apresentado um exemplo de como especificar um comando *Linecode* no *software* OpenDSS.

```
New Linecode.Arranjo1  Phases=3  baseFreq=60  Units=km  Normamps=125
~R1=0.06  X1=0.12  R0=0.18  X0=0.40   ! ohm/km
~C1=3  C0=1                           ! nF/km
```

No código tem-se:

- Uma *New Linecode* definida com o nome de Arranjo1;
- Linha trifásica a três fios;
- Frequência de 60 Hz;
- Unidade de comprimento em quilômetro (km);

- Corrente nominal da linha de 125 A;
- Valores de R1 e R0 - resistência de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, respectivamente;
- Valores de X1 e X0 - reatância de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, respectivamente; e
- Valores de C1 e C0 - capacitância total de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, respectivamente.

Tabela 3 - Parâmetros básicos da *Linecode*

Parâmetro	Descrição
Phases	Número de fases
baseFreq	Frequência base que os valores de impedância são especificados
R1(Ω)	Resistência de sequência positiva por unidade de distância
R0(Ω)	Resistência de sequência zero por unidade de distância
X1(Ω)	Reatância de sequência positiva por unidade de distância
X0(Ω)	Reatância de sequência zero por unidade de distância
Rmatrix	Matriz de resistência da linha por unidade de distância
Xmatrix	Matriz de reatância da linha por unidade de distância
C1(nF)	Capacitância total de sequência positiva por unidade de distância
C0(nF)	Capacitância total de sequência zero por unidade de distância
Units	Unidade de medida de comprimento
Normamps	Corrente nominal do cabo

Fonte: Elaboração própria (2019).

3.5.4 Comando *New Transformer*

Os transformadores são elementos de transporte de energia que apresentam dois terminais com dois ou mais enrolamentos, podendo ser monofásicos ou multifásicos. Para especificar o transformador é necessário que se defina algumas características do mesmo, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros básicos do *Transformer*

Parâmetro	Descrição
Phases	Número de fases (o padrão é 3)
Windings	Número de enrolamento (o padrão é 2)
%loadloss	Percentual de perda total com base na carga nominal
%noloadloss	Percentual de perda a vazio com base na carga nominal
XHL (pu)	Reatância percentual do primário para o secundário
XLT (pu)	Reatância percentual do secundário para o terciário
XHT (pu)	Reatância percentual do primário para o terciário
Bus	Nome da barra a qual o enrolamento está conectado
Conn	Conexão do enrolamento (delta ou estrela)
kV	Tensão nominal do enrolamento em kV
kVA	Potência nominal do enrolamento em kVA
Tap(pu)	Tensão que o tap está ajustado

Fonte: Elaboração própria (2019).

3.5.4.1 Transformador trifásico de 2 enrolamentos delta-estrela aterrado

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um transformador trifásico de dois enrolamentos.

```
New Transformer.T1  Phases=3  Windings=2  XHL=5  %loadloss=0.5  %noloadloss=0.3
~ wdg=1 bus=200   conn=delta   kV=13.8    kVA=6000   tap=1
~ wdg=2 bus=300   conn=wye    kV=0.38    kVA=6000   tap=1.05
```

No código tem-se:

- Um *New Transformer* definido com o nome de T1;
- Transformador trifásico;
- Dois enrolamentos;
- Reatância percentual de 5%;
- Percentual de perdas total de 0,5%;
- Percentual de perdas a vazio de 0,3%;
- Enrolamento primário ligado na barra 200 com tensão de 13,8 kV;
- Enrolamento secundário ligado na barra 300 com tensão de 0,38 kV;
- Conexão tipo delta-estrela;
- Potência nominal dos enrolamentos de 6.000 kVA
- Tap primário ajustado em 1 pu; e
- Tap secundário ajustado em 1,05 pu.

3.5.4.2 Transformador trifásico de 3 enrolamentos

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um transformador trifásico de três enrolamentos.

```
New Transformer.T2  Phases=3  Windings=3  XHL=6  %loadloss=0.6  %noloadloss=0.4
~ wdg=1 bus=200   conn=delta    kV=13.8    kVA=200   tap=1
~ wdg=2 bus=300   conn=delta    kV=0.38    kVA=200   tap=1.05
~ wdg=3 bus=400   conn=wye     kV=0.22    kVA=200   tap=1
```

No código tem-se:

- Um *New Transformer* definido com o nome de T2;
- Transformador trifásico;
- Três enrolamentos;
- Reatância percentual de 6%;
- Percentual de perdas total de 0,6%;
- Percentual de perdas a vazio de 0,4%;
- Enrolamento primário ligado na barra 200 com tensão de 13,8 kV;
- Enrolamento secundário ligado na barra 300 com tensão de 0,38 kV;
- Enrolamento terciário ligado na barra 400 com tensão de 0,22 kV;
- Conexão tipo delta-estrela;
- Potência nominal dos enrolamentos de 6.000 kVA
- Tap primário ajustado em 1 pu;
- Tap secundário ajustado em 1,05 pu; e
- Tap terciário ajustado em 1 pu.

3.5.4.3 Transformador monofásico de 2 enrolamentos

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um transformador monofásico de 2 enrolamentos.

```
New Transformer.T3  Phases=1  Windings=2  XHL=6  %loadloss=0.6  %noloadloss=0.4
~ wdg=1 bus=200.1   conn=delta   kV=13.8   kVA=200   tap=1
~ wdg=2 bus=300.1   conn=delta   kV=0.38   kVA=200   tap=1.05
```

No código tem-se:

- Um *New Transformer* definido com o nome de T3;
- Transformador monofásico;
- Dois enrolamentos;
- Reatância percentual de 6%;
- Percentual de perdas total de 0,6%;
- Percentual de perdas a vazio de 0,4%;

- Enrolamento primário ligado na barra 200 e conector 1 com tensão de 13,8 kV;
- Enrolamento secundário ligado na barra 300 e conector 1 com tensão de 0,38 kV;
- Conexão tipo delta-delta;
- Potência nominal dos enrolamentos de 200 kVA
- Tap primário ajustado em 1 pu; e
- Tap secundário ajustado em 1,05 pu;

3.5.4.4 Banco trifásico com 3 transformadores monofásico

Abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um banco trifásico de transformadores.

```
New Transformer.T4  Phases=1  Windings=2  XHL=6  %loadloss=0.6  %noloadloss=0.4
~ wdg=1 bus=200.1   conn=delta   kV=13.8   kVA=200   tap=1
~ wdg=2 bus=300.1   conn=delta   kV=0.38   kVA=200   tap=1.05

New Transformer.T5  Phases=1  Windings=2  XHL=6  %loadloss=0.6  %noloadloss=0.4
~ wdg=1 bus=200.2   conn=delta   kV=13.8   kVA=200   tap=1
~ wdg=2 bus=300.2   conn=delta   kV=0.38   kVA=200   tap=1.05

New Transformer.T6  Phases=1  Windings=2  XHL=6  %loadloss=0.6  %noloadloss=0.4
~ wdg=1 bus=200.3   conn=delta   kV=13.8   kVA=200   tap=1
~ wdg=2 bus=300.3   conn=delta   kV=0.38   kVA=200   tap=1.05
```

No código tem-se:

- Um conjunto de 3 *New Transformer* definidos com o nome de T4, T5, T6, respectivamente;
- 3 transformadores monofásicos;
- Dois enrolamentos para cada transformador monofásico;
- Reatância percentual de 6%;
- Percentual de perdas total de 0,6%;
- Percentual de perdas a vazio de 0,4%;
- Enrolamento primário do T4 ligado na barra 200 e conector 1 com tensão de 13,8 kV;
- Enrolamento secundário do T4 ligado na barra 300 e conector 1 com tensão de 0,38 kV;

- Enrolamento primário do T5 ligado na barra 200 e conector 2 com tensão de 13,8 kV;
- Enrolamento secundário do T5 ligado na barra 300 e conector 2 com tensão de 0,38 kV;
- Enrolamento primário do T6 ligado na barra 200 e conector 3 com tensão de 13,8 kV;
- Enrolamento secundário do T6 ligado na barra 300 e conector 3 com tensão de 0,38 kV;
- Conexão tipo delta-delta; e
- Potência nominal dos enrolamentos de 200 kVA.

3.5.5 Comando *New Regcontrol*

A principal função do objeto *Regcontrol* é monitorar e controlar a tensão no enrolamento do transformador, o tap deste equipamento é alterado para o controle de tensão desejado no enrolamento do transformador. Existe também a possibilidade de o regulador realizar compensação de queda de tensão na linha. A compensação é feita alterando o tap do primário do transformador. Essa função do regulador simula a impedância vista até o ponto no qual se deseja controlar a tensão. Na Tabela 5 estão os principais parâmetros utilizados para definir o objeto *Regcontrol.*

Tabela 5 - Parâmetros básicos do *Regcontrol*

Parâmetro	Descrição
Transformer	Nome do transformador controlado
Windings	Número de enrolamento do transformador controlado
Vreg	Tensão a qual se deseja ajustar
Pratio	Prelação de transformação do transformador potencial
Band	Reatância percentual do primário para o secundário

Fonte: Elaboração própria (2019).

Abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um objeto *New Regcontrol*.

```
New Transformer.wind  phases=3 xhl=5.750000
~ wdg=1 bus=H  kV=13.8 kVA=750 conn=wye  tap=1
~ wdg=2 bus=C  kV=13.8 kVA=750 conn=wye  tap=1

New Regcontrol.Reg_Eólico  Transformer=wind winding=2 vreg=122 band=3
~ ptratio=60 delay=15
```

3.5.6 Comando New Load

Para modelar as cargas (elemento de conversão de energia) é necessário que se defina pelo menos dois valores de suas grandezas elétricas, como:

- Potência ativa (kW) e Potência reativa (kvar);
- Potência ativa e fator de potência; ou
- Potência aparente e fator de potência.

Além disto, existem modelos de elementos de cargas que são implementados no OpenDSS como pode ser visto na Tabela 6 (ANEEL, 2014).

Tabela 6 - Principais modelos de carga

Modelo	Descrição
1	Potência constante (P)
2	Impedância constante
3	Potência ativa constante e potência reativa modelada como uma reatância constante.
4	Potência ativa e reativa variando de modo exponencial
5	Corrente constante

8	Modelo ZIP contendo os expoentes de potência ativa e reativa para os três modelos de carga (impedância constante, corrente constante e potência constante)

Fonte: Elaboração própria (2019).

Na Tabela 7 estão os principais parâmetros utilizados para definição do elemento *Load*.

Tabela 7 – Parâmetros do elemento *Load*

Parâmetro	Descrição
Phases	Número de fases
Bus1	Nome da barra que a carga está conectada
kV	Tensão nominal da carga
kVA	Potência aparente nominal
kW	Potência ativa nominal
kvar	Potência reativa nominal
FP	Fator de potência
Daily	Nome da curva de carga associada a mesma

Fonte: Elaboração própria (2019).

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar cargas.

```
New Load.CARGA1   bus1=G phases=1  conn=wye  model=8  kv=0.22  kW=10 pf=0.9      daily=Curva_de_CargaAA
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.90)
New Load.CARGA2   bus1=B phases=3  conn=delta  model=8  kv=13.8  kW=1000   pf=0.9  daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
```

No código tem-se:

- Carga1:
  - Conectada à barra G;
  - Carga monofásica;
  - Tipo de conexão estrela;
  - Tensão de 220 V;
  - Potência de 10 kW com fator de potência de 0,9.
  - Modelo de carga ZIP (modelo 8); e
  - *Daily* – Curva de carga associada.

- Carga2:
  - Conectada à barra B;
  - Carga trifásica;
  - Tipo de conexão delta;
  - Tensão de 13,8 kV;
  - Potência de 1.000 kW com fator de potência de 0,9.
  - Modelo de carga ZIP (modelo 8); e
  - *Daily* – Curva de carga associada.

3.5.7 Comando *New Capacitor*

Classificados como elementos fornecedores de energia, os capacitores possuem um terminal quando ligados em paralelo e dois quando ligados em série.

Na Tabela 8 estão apresentados os principais parâmetros utilizados para definição do elemento *Capacitor*.

Tabela 8 – Parâmetro do elemento *Capacitor*

Parâmetro	Descrição
Phases	Número de fases
Bus1	Nome da barra que o capacitor está conectado
Bus2	Nome da segunda barra que o capacitor está conectado quando ligado em série
kV	Tensão nominal
kvar	Potência reativa

Fonte: Elaboração própria (2019).

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar banco de capacitores.

```
New Capacitor.BANCO_CAPACITORES  phases=3  bus1=B  kvar=80  kv=13.8
```

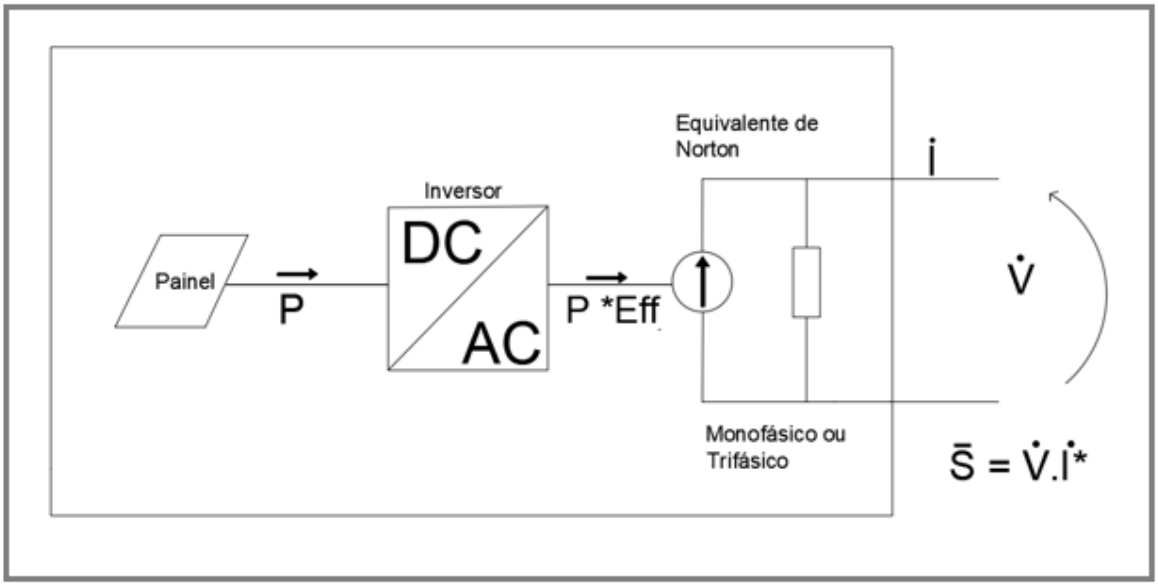
Na figura anterior é observado um banco de capacitores trifásico conectado ao barramento B fornecendo uma potência reativa de 80 kvar com uma tensão nominal de 13,8 kV.

3.6 Modelo de um Sistema Fotovoltaico no OpenDSS

O OpenDSS dispõe de um modelo desenvolvido para simular uma geração fotovoltaica, o PVSystem *Element Model*, que reúne um modelo de gerador e de inversor fotovoltaico em um modelo conveniente para realizar estudos de impacto em sistemas de distribuição (ANZANELLO, 2016).

No elemento *PVSystem* encontram-se dois componentes que geram um modelo matemático: o módulo fotovoltaico e o inversor. Na Figura 7 é apresentado o diagrama do modelo.

Figura 7 - Diagrama de bloco do modelo de um sistema fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria (2019)

Os dados de entrada que o *software* OpenDSS precisa são:

- A potência no ponto de máxima potência nominal (Pmp – 1 kW/m^2);
- Temperatura de base;
- Irradiação de base;
- Curva de Irradiação em pu ao longo do dia;
- Curva de temperatura ao longo do dia.
- Tensão;
- Tipo de conexão (estrela ou triângulo);
- Fator de potência.

Normalmente os parâmetros elétricos do painel solar fotovoltaico são apresentados sob condições padrão (STC – *standard test conditions*), aonde a temperatura da célula é de 25ºC e irradiância de 1000w/m² com um espectro de massa de ar de 1,5.

P(t) = *Pmp* x *Irrad(t)* x *Irrad(base)* x *Pmp (pu, T(t))* (14)

Onde:

P(t): Potência de saída no instante t;

Pmp: Potência nominal no ponto de máxima potência;

Irrad (t): Valor da irradiância em pu no instante t;

Irrad (base): Valor máximo da irradiância no dia selecionado; e

Pmp (pu, T(t)): Fator de correção do Pmp em função da temperatura no instante.

A potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico é apresentada na equação 15.

$$P_{saida\text{-}ativa} = P(t) \times Eff \quad (15)$$

Onde:

Eff: é a eficiência do inversor para uma determinada potência de saída.

Na Tabela 9 estão os principais parâmetros utilizados para definição do elemento *PVSystem.*

Tabela 9 - Parâmetro básicos do elemento PVSystem

Parâmetro	Descrição
kV	Tensão de linha nominal em kV
Bus1	Nome da barra que está conectada ao seu terminal
kVA	Potência nominal do inversor
PF	Fator de Potência
Irrad	Irradiação nominal (base)
Pmp	Potência nominal no ponto de máxima potência
Temperature	Temperatura de operação do módulo
Effcurve	Curva de eficiência por potência
P-Tcurve	Potência por temperatura, Pmp(pu,T(t))

Daily	Irradiância diária, irradiância (pu(t))
Tdaily	Temperatura diária

Fonte: Elaboração própria (2019)

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um sistema fotovoltaico.

```
New XYcurve.Pot_Temp npts=4 xarray=[0 25 75 100] yarray=[1.2 1 0.8 0.6]
New XYcurve.Eficiência npts=4 xarray=[0.1 0.2 0.4 1] yarray=[0.86 0.9 0.93 0.97]

New Loadshape.Irradiação npts=24 interval=1
~  mult=[0 0 0 0 0 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 1 1 1 0.9 0.7 0.1 0 0 0 0 0 0 ]

New Tshape.Temp_Painel npts=24   interval=1
~  temp=[25 25 25 25 25 25 25 30 40 50 60 60 70 70 65 50 50 40 25 25 25 25 25 25]

New PVSystem.PV  phases=3  bus1=F  kv=0.38  irrad=0.98  pmpp=50  temperature=25 pf=1
~  %cutin=0.1 %cutout=0.1 Effcurve=Eficiência  P-TCurve=Pot_Temp  Daily=Irradiação  TDaily=Temp_Painel

New Transformer.PV  phases=3   Xhl=2   %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
~  wdg=1   bus=F   conn=wye   kv=0.38   kVA=250  tap=1
~  wdg=2   bus=E   conn=delta  kv=13.8   kVA=250  tap=1
```

Na figura anterior observa-se:

- Na primeira e segunda linha - Curvas de potência por temperatura e eficiência respectivamente;
- Na terceira e quarta linha – Irradiação em um período de 24 horas;
- Na quinta e sexta linha – Temperatura em um período de 24 horas;
- Na sétima e oitava linha – É definido o elemento *PVSystem; e*
- Últimas linhas - Transformador responsável com a conexão ao sistema.

3.7 Modelo de um Sistema Eólico no OpenDSS

Para inserir ao sistema um gerador eólico é necessário definir o elemento *Generator* no código. Segundo Freitas (2015), é possível encontrar 3 principais tecnologias de geradores eólicos como pode ser visto a seguir:

- Tipo I: Gerador de indução em gaiola de esquilo;
- Tipo II: Gerador de indução com acesso ao seu rotor; e
- Tipo III: Gerador de indução duplamente alimentado.

Obs. Para parametrizar as curvas de potência em um período determinado é necessário utilizar a função do OpenDSS *Loadshape,* geralmente esta curva é importada de um arquivo externo contendo as informações de potencias.

3.7.1 Gerador Tipo I

Na Tabela 10 estão apresentados os principais parâmetros utilizados para definição do Gerador eólico Tipo I.

Tabela 10 - Parâmetro do gerador eólico Tipo I

Parâmetro	Descrição
Generator	Novo Gerador no sistema
Bus1	Nome da barra que está conectada o terminal do novo gerador
Pf	Fator de potência
kW	Potência ativa nominal do gerador eólico
kV	Tensão nominal
Model 6	Modelo usado
Usermode	Define o tipo de gerador
Daily	Define a curva de potência durante o período
Userdata	Parâmetros elétricos do gerador
Loadshape	Curva de potência durante o período

Fonte: Elaboração própria (2019)

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um gerador eólico Tipo I.

```
New LoadShape.3 npts=24 interval=1 mult=(File=LoadShape3.csv)
New generator.Eólico bus1=H kv=13.8 kw=100  pf=0.92 daily=3 model=6
~ usermode=indmach012a userdata=(Rs=0.00046, Xs=0.1202, Rr=0.10993, Xr=0.18084, Xm=6.84)
```

3.7.2 Gerador Tipo II

Nesse caso é utilizado um gerador de indução com acesso ao seu rotor para se conectar um resistor, possibilitando dessa forma uma maior variação na velocidade de operação. Por se tratar de um motor de indução essa tecnologia carrega todas as desvantagens do último modelo, somado ainda com: maior custo, menor robustez e perda Joule no resistor. Para modelar esse Tipo no OpenDSS, além de utilizar o mesmo modelo do caso anterior é necessário acessar o OpenDSS via COM. Esse é a única maneira de se alterar a resistência do rotor de forma automática durante a simulação. Portanto, para se usufruir desse modelo é necessário criar um controle utilizando *software* como, por exemplo, Python, MATLAB, VBA, dentre outros (FREITAS, 2015).

3.7.3 Gerador Tipo III

Para esse caso o estator do gerador é conectado diretamente à rede elétrica e o rotor é alimentado através de dois conversores de potência conectados *back-to-back*. Uma vantagem em utilizar este tipo de gerador é a possibilidade de estabelecer um controle através de um conversor com apenas 30% da capacidade da capacidade do gerador de indução.

Na Tabela 11 estão apresentados os principais parâmetros utilizados para definição do gerador eólico Tipo III.

Tabela 11 -Parâmetro do gerador eólico Tipo III

Parâmetro	Descrição
Generator	Novo Gerador no sistema
Bus1	Nome da barra que está conectada o terminal do novo gerador
Pf	Fator de potência
kW	Potência ativa nominal do gerador eólico
kV	Tensão nominal
Model 1	Modelo usado
Loadshape	Curva de potência durante o período

Fonte: Elaboração própria (2019)

Logo abaixo é apresentado um exemplo utilizado pelo OpenDSS de como especificar um gerador eólico Tipo III.

```
New LoadShape.3 npts=24 interval=1 mult=(File=LoadShape3.csv)
New generator.Eólico bus1=H kv=13.8 kw=100
~ pf=0.92 daily=3 model=1
```

4 ESTUDO DE CASO

Para facilitar a compreensão são apresentados alguns estudos de casos que permitem a modelagem dos equipamentos elétricos em linguagem usada no *software*. Nesta seção é apresentado de forma simplificada um dos estudos de caso presentes no Apêndice A, Cenário 3 do tutorial – sistema equilibrado com GD.

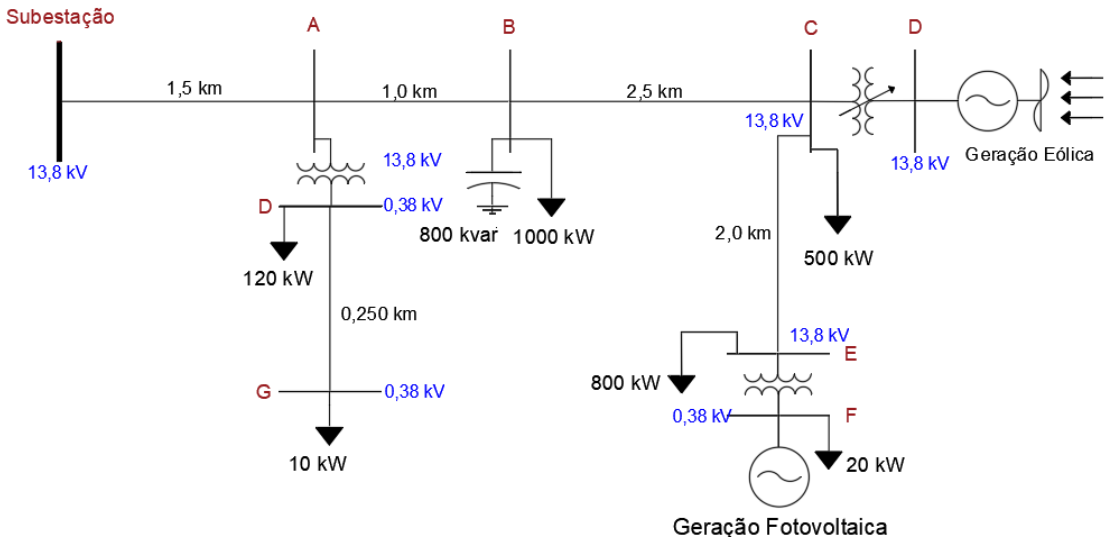
O estudo de caso apresentado está organizado da seguinte maneira:

- Diagrama hipotético do sistema a ser estudado;
- Modelagem dos Equipamentos;
- Principais Resultados da simulação.

4.1 Apresentação do sistema hipotético

Na Figura 8 é apresentado o diagrama do sistema hipotético do estudo de caso.

Figura 8 - Diagrama unifilar de um sistema com a presença de GD



Fonte: Elaboração própria (2019)

O sistema hipotético analisado tem 8 barras e o barramento da subestação, 1 gerador fotovoltaico e 1 gerador eólico conectado no sistema, além dos

equipamentos normais de sistemas de distribuição. O sistema possui uma tensão nominal no alimentador (subestação) de 13,8 kV, possuindo linhas trifásicas e uma linha de 250 metros de extensão monofásica entre o barramento D e G. O sistema precisa alimentar uma carga total de 2.430 kW, sendo estes consumidores distribuídos nos barramentos do sistema.

4.2 Modelagem do sistema

Os dados do sistema foram modelados de acordo com a ordem a seguir.

4.2.1 Modelagem do alimentador

O alimentador é modelado através do equivalente de Thévenin por meio de uma aproximação matemática. A frequência e a tensão em pu são 60 Hz e 1,0 pu, respectivamente quando não especificados pelo usuário. Foi definida uma potência de curto-circuito trifásica de 20.000 MVA e uma potência de curto-circuito monofásica de 21.000 MVA. Logo abaixo é apresentada a modelagem do alimentador no OpenDSS.

```
Clear
New Circuit.Subestação  phases=3  bus=subestação  basekV=13.8
~ mvasc3=20000  mvasc1=21000
```

4.2.2 Modelagem das linhas de distribuição

O sistema possui linhas com características elétricas idênticas, portanto para simplificar e diminuir o número de linhas de código foi usada a ferramenta *Linecode* para armazenar as informações das linhas. Desta forma quando o usuário criar uma nova linha de distribuição no sistema basta apenas fazer a declaração do *Linecode* correlata à linha criada. Abaixo é apresentada a modelagem das linhas de distribuição do sistema hipotético.

```
New Linecode.Arranjo1   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix= [0.18 |  0  0.222 | 0  0  0.222]
~ xmatrix= [0.40 | 0  0.402 |  0  0  0.402]
~ cmatrix= [2.74 | 0  2.96 | 0  0  2.74]
New Linecode.Arranjo2   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix= [0.45 |  0  0.705 | 0  0  0.705]
~ xmatrix= [0.35 | 0  0.450 |  0  0  0.450]
~ cmatrix= [2.74 | 0  2.96 | 0  0  2.74]


New Line.Linha1   phases=3   bus1=Subestação   bus2=A   Linecode=Arranjo1
~ length=1.5   units=km

New Line.Linha2   phases=3   bus1=A   bus2=B   Linecode=Arranjo1
~ length=1.0   units=km

New Line.Linha3   phases=3   bus1=B   bus2=C   Linecode=Arranjo2
~ length=2.5    units=km

New Line.Linha4   phases=3   bus1=C   bus2=E   Linecode=Arranjo2
~ length=2.0     units=km

New Line.Linha5   phases=1   bus1=D   bus2=G   R1=0.443   X1=0.428
~ length=0.250   units=km
```

4.2.3 Modelagem dos Transformadores

O sistema apresenta 2 transformadores com tensão primária de 13,8 kV e tensão secundária de 380 V, com ligação delta/estrela e potência nominal de 150 kVA. Logo abaixo é apresentada a modelagem dos transformadores abaixadores de tensão.

```
New Transformer.TRAFO1 phases=3 windings=2 Xhl=2 %loadloss=0.5 %noloadloss=0.5  %imag=0.5
~ wdg=1  bus1=A  conn=delta  kV=13.8  kVA=150  tap=1
~ wdg=2  bus1=D  conn=wye  kV=0.38  kVA=150  tap=1

New Transformer.TRAFO2 phases=3 windings=2 Xhl=2 %loadloss=0.5 %noloadloss=0.5  %imag=0.5
~ wdg=1  bus1=E  conn=delta  kV=13.8  kVA=150  tap=1
~ wdg=2  bus1=F  conn= wye  kV=0.38  kVA=150  tap=1
```

4.2.4 Modelagem do Banco de Capacitores

O sistema possui um banco de capacitores trifásico no barramento B de 800 kva de potência reativa e a modelagem do mesmo pode ser vista logo abaixo.

```
New Capacitor.BANCO_CAPACITORES  phases=3  bus1=B  kV=13.8  kVA=800
```

4.2.5 Modelagem das Cargas

O sistema é composto por 6 cargas como pode ser visto na Tabela 12. A modelagem pode ser vista logo depois.

Tabela 11 - Dados das Cargas

	Fases	Conexão	Tensão Nominal (kV)	Modelo de Carga	Potência (kW)	Fator de Potência
CARGA1	1	Estrela	0,22	ZIP	10	0,90
CARGA2	3	Delta	13,8	ZIP	1000	0,90
CARGA3	3	Delta	13,8	ZIP	500	0,90
CARGA4	3	Delta	13,8	ZIP	800	0,90
CARGA5	3	Delta	13,8	ZIP	20	0,90
CARGA6	3	Delta	13,8	ZIP	120	0,90

Fonte: Elaboração própria (2019)

```
New Load.CARGA1  phases=1 bus1=G  conn=wye   model=8  kV=0.22  kW=10    pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA2  phases=3 bus1=B  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=1000 pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA3  phases=3 bus1=C  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=500  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA4  phases=3 bus1=E  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=800  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA5  phases=3 bus1=F  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=20   pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA6  phases=3 bus1=D  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=120  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
```

4.2.6 Modelagem do Gerador Fotovoltaico no OpenDSS

Para modelagem do gerador fotovoltaico no software OpenDSS é necessário parametrizar algumas curvas como: curva de potência do painel em função da temperatura, curva de eficiência em função da potência em pu, curva de irradiação no período e curva de temperatura durante o dia. Para conectar o gerador fotovoltaico

ao sistema é necessário um transformador de tensão. A modelagem do gerador fotovoltaico é apresentada logo abaixo.

```
New XYcurve.Pot_Temp npts=4 xarray=[0 25 75 100] yarray=[1.2 1 0.8 0.6]

New XYcurve.Eficiência npts=4 xarray=[0.1 0.2 0.4 1] yarray=[0.86 0.9 0.93 0.97]

New Loadshape.Irradiação npts=24 interval=1
~  mult=[0 0 0 0 0 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 1 1 1 0.9 0.7 0.1 0 0 0 0 0 0 ]

New Tshape.Temp_Painel npts=24   interval=1
~  temp=[25 25 25 25 25 25 25 30 40 50 60 60 70 70 65 50 50 40 25 25 25 25 25 25]

New PVSystem.PV  phases=3  bus1=F  kv=0.38  irrad=0.98  pmpp=250  temperature=25 pf=1
~  %cutin=0.1 %cutout=0.1 Effcurve=Eficiência  P-TCurve=Pot_Temp  Daily=Irradiação  TDaily=Temp_Painel


New Transformer.PV  phases=3    Xhl=2   %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
~  wdg=1   bus=F   conn=wye   kv=0.38   kVA=250  tap=1
~  wdg=2   bus=E   conn=delta  kv=13.8   kVA=250  tap=1
```

4.2.7 Modelagem do Gerador Eólico no OpenDSS

O gerador eólico necessita de uma curva de potência e um transformador de tensão para conexão com o sistema. O código do gerador eólico em linguagem OpenDSS é apresentado abaixo.

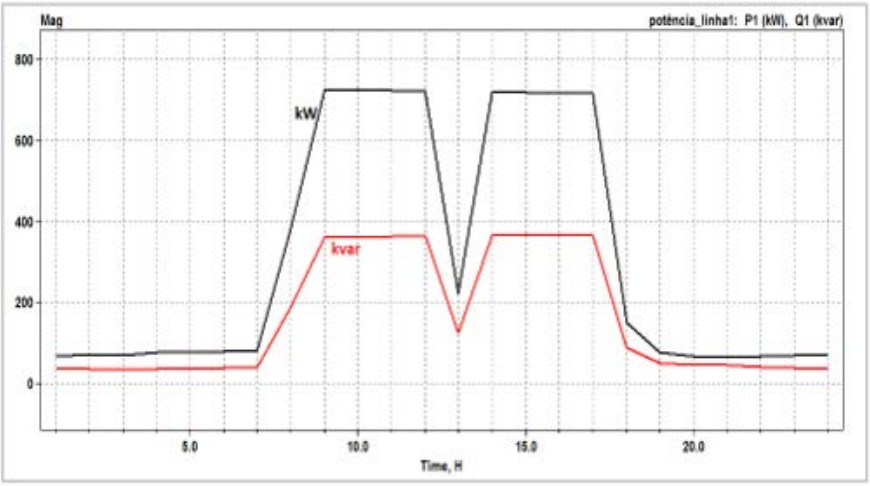
```
New LoadShape.3 npts=24   interval=1   %mult=(File=LoadShape3.csv)

New Transformer.wind   phases=3   xhl=5.75
~ wdg=1  bus=H  kV=13.8  kVA=750  conn=wye  tap=1
~ wdg=2  bus=C  kV=13.8  kVA=750  conn=wye  tap=1

New Regcontrol.Reg_Eólico  Transformer =wind  winding=2   vreg=122
~ band=3

New Generator.Eólico   bus1=H  kv =13.8  kW=100  pf= 0.92  daily=3
~ model=6  usermode= indmach012a
~ userdata=(Rs=0.00046, Xs=0.1202, Rr=0.10993, Xr=0.18084, Xm=6.84)
```

4.3 Principais Resultados da Simulação

Serão apresentados alguns resultados da simulação feita no OpenDSS, o propósito não é obter o significado de cada resultado, mas apresentar ao usuário como realizar a simulação na plataforma do OpenDSS e como visualiza-lo.

Na Figura 9 é apresentado o gráfico da potência ativa e reativa de saída do alimentador durante um período de 24 horas.

Figura 9 - Potência fornecida pela subestação

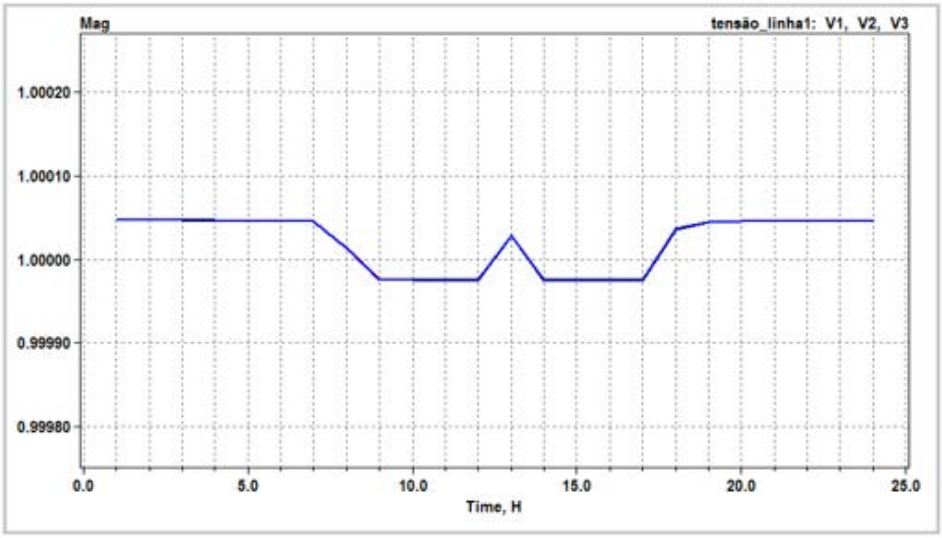


Fonte: Elaboração própria (2019)

Na figura anterior é apresentado um perfil de potência de um consumidor industrial, como pode ser observado, há uma queda de potência no horário de almoço.

Na Figura 10 é apresentado o gráfico da tensão em pu no barramento da subestação.

Figura 10 - Tensão no barramento da subestação



Fonte: Elaboração própria (2019)

Na figura anterior um perfil de tensão um consumidor industrial, há um aumento de tensão no horário de almoço.

Na Figura 11 são apresentados os dados de energia ao longo de 24 horas na subestação.

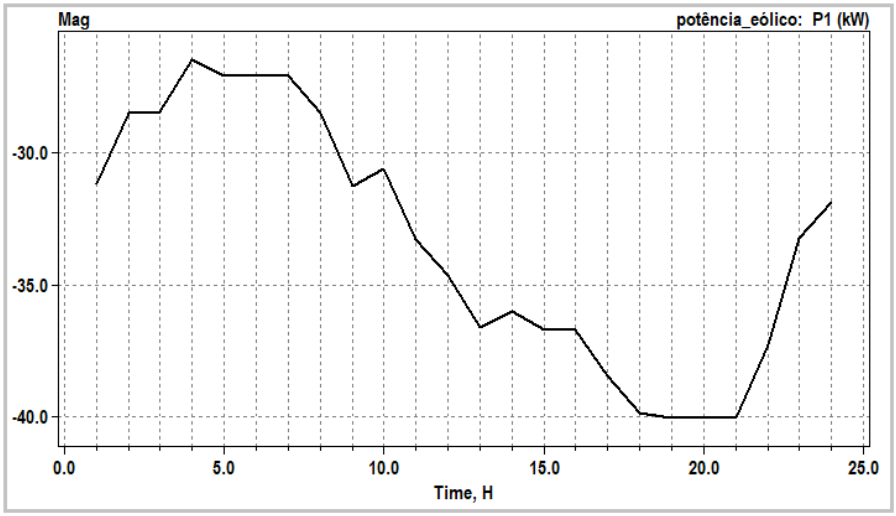
Figura 11 - Dados Energy Meter

```
Reg 1 = kWh-------------------------24756
Reg 2 = kvarh --------------------- 10274
Reg 3 = Max kW --------------------- 2277
Reg 4 = Max kVA -------------------- 2502
Reg 5 = Zone kWh ------------------ 24670
Reg 6 = Zone kvarh ---------------- 11742
Reg 7 = Zone Max kW ---------------- 2266
Reg 8 = Zone Max kVA --------------- 2507
Reg 9 = Overload kWh Normal ----------- 0
Reg 10 = Overload kWh Emerg ----------- 0
Reg 11 = Load EEN ---------------------- 0
Reg 12 = Load UE ----------------------- 0
Reg 13 = Zone Losses kWh ------------ 338
Reg 14 = Zone Losses kvarh ---------- 433
Reg 15 = Zone Max kW Losses ---------- 38
Reg 16 = Zone Max kvar Losses -------  48
Reg 17 = Load Losses kWh -----------  319
Reg 18 = Load Losses kvarh ---------  386
Reg 19 = No Load Losses kWh ---------- 19
Reg 20 = No Load Losses kvarh -------  47
```

Fonte: Elaboração própria (2019)

A potência ativa fornecida pelo gerador eólico para o sistema durante o período pode ser visualizada na Figura 12.

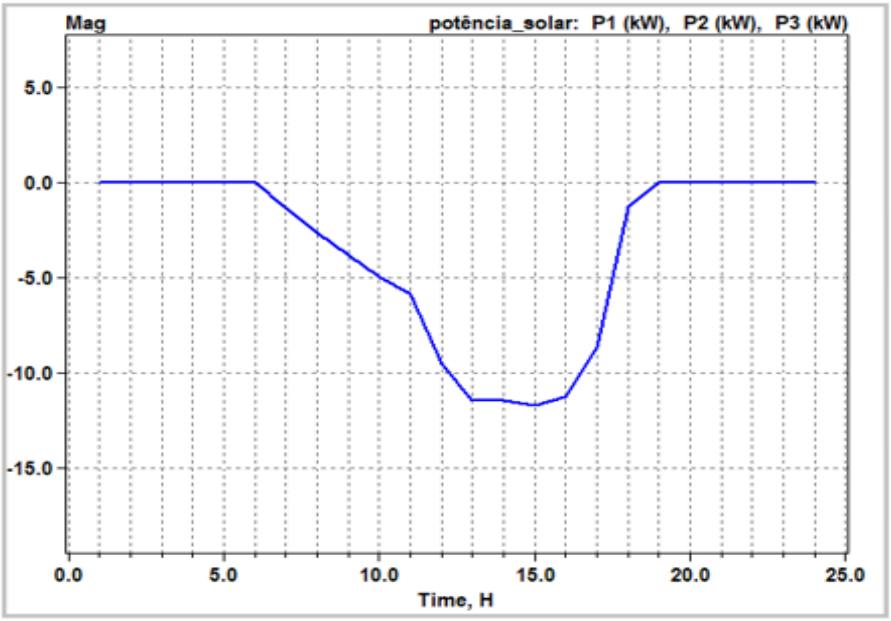
Figura 12 - Potência ativa fornecida pelo gerador eólico



Fonte: Elaboração própria (2019)

A potência fornecida pelo gerador fotovoltaico para o sistema durante o período pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 – Potência fornecida pelo gerador fotovoltaico



Fonte: Elaboração própria (2019)

Na figura anterior é possível observar que o horário de maior irradiação está entre 13 às 15 horas, refletindo diretamente na potência de saída do gerador fotovoltaico.

5 CONCLUSÃO

A modernização do setor elétrico brasileiro através da inserção de fontes alternativas de energia, como energia fotovoltaica e eólica, combinada às redes inteligentes, podem contribuir para aumentar a oferta de energia elétrica no sistema, contudo é preciso analisar o impacto que estas novas fontes causam na rede de distribuição, principalmente relacionado às perdas técnicas.

Neste contexto, a agência reguladora brasileira com o objetivo de proporcionar um sinal de eficiência para estimular as empresas a atuarem no controle das perdas técnicas, adotou um programa de simulação de redes de distribuição para cálculo das perdas por meio de fluxo de potência. O *software* escolhido pela ANEEL foi o OpenDSS.

O presente trabalho propôs apresentar o *software* e desenvolver um tutorial de forma didática abordando suas principais funcionalidades, de forma que o usuário seja capaz de compreendê-lo e colocá-lo em prática de maneira descomplicada. O estudo do manual do *software* OpenDSS desenvolvido pela EPRI, assim como o estudo de outros trabalhos relacionados ao tema foram a base para o desenvolvimento do tutorial.

Para explicar as principais funções do *software* OpenDSS referente ao fluxo de potência e as perdas na rede de distribuição, o tutorial exposto neste trabalho apresenta 3 exemplos hipotéticos de um sistema de distribuição com características diferentes. O primeiro sistema mostra um circuito equilibrado sem a presença de GD, o segundo um sistema desequilibrado sem GD, e o terceiro um sistema equilibrado com a presença de geração fotovoltaica e eólica. Em todos os sistemas é apresentado ao usuário como modelar os equipamentos elétricos, ao mesmo tempo é mostrado as principais ferramentas do OpenDSS de forma didática e prática. Após a parametrização de todos os equipamentos em cada caso, é apresentado como é feita a simulação e obter as principais grandezas elétricas do sistema.

Finalmente, observa-se que o *software* OpenDSS usado como ferramenta de análise de sistema de distribuição tem atingido os objetivos inicialmente propostos.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se os seguintes estudos a serem realizados no OpenDSS a fim de acrescentar e aprimorar o presente trabalho:

- Análise de harmônicos nos estudos de fluxo de potência;
- Análise de falta (curto-circuito);
- Bancos de capacitores controlados; e
- Utilizar outras plataformas de *software* existentes para controlar o OpenDSS.

.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida. Acesso em: 01 nov. de 2019a.

ANEEL. **Perdas de Energia**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false. Acesso em: 13 mai. 2019b.

BAROUCHE, Iuri O. **Análise comparativa e proposições de metodologias de cálculo de perdas técnicas**. 190f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2017. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/321981/1/Barouche_IuridеOliveira_M.pdf. Acesso em: 13 mai. 2019.

BAROUCHE, Iuri O.; SILVA, Luiz C. P. Novas Proposições Metodológicas para o Cálculo das Perdas Técnicas no âmbito do 4° Ciclo de Revisões Tarifárias Periódicas. **XXII SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**. Curitiba-PR, 2016. Disponível em: http://abradee03.org/sendi2016/trabalhos/novas-proposicoes-metodologicas-para-o-calculo-das-perdas-tecnicas-no-ambito-do-4o-ciclo-de-revisoes-tarifarias-periodicas/. Acesso em 07 jun. 2019.

BRESSAN, Natália T. **Análise do Crescimento da Geração Distribuída Brasileira com ênfase no Potencial Energético da Região Norte.** 77f. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de são Carlos, da Universidade de são Paulo. São Carlos, 2016. Disponível em: http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-10012017-165059/publico/Bressan_Natalia_Trevizoli_tcc.pdf. Acesso em: 28 out. de 2019.

CARVALHO, Fabiano F. **Estudo do Simulador OpenDSS**. 119f. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/332.pdf. Acesso em: 11 abr. 2019.

DUGAN, R. C. **The Open Distribution System Simulator OpenDSS**. Disponível em: ftp://197.155.77.3/sourceforge/e/el/electricdss/OpenDSS/OpenDSSManual.pdf. Acesso em: 13 mai. 2019.

EICHKOFF, Henrique S. **Análise da Geração Distribuída para o Controle de Tensão e Potência Reativa em Sistema Modernos de Distribuição.** 95f. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Federal do Pampa. Alegrete, 2018. Disponível em: http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/3306/1/Henrique%20Silveira%20Eichkoff-2018.pdf. Acesso em: 21 mai. 2019.

EPRI. **What is OpenDSS?** Disponível em: https://www.epri.com/#/pages/sa/opendss?lang=en. Acesso em: 22 abr. 2019.

FREITAS, Paulo R. R. **Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando software OpenDSS**. 189f. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

ANZANELLO, JÚNIOR. D. **Análise de Microgeração Fotovoltaica em um Sistema de Distribuição Utilizando o OpenDSS**. 27f. 2016. Requisitos para obtenção do título de engenheiro de energia. Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/151342/001010612.pdf?sequence=1. Acesso em: 28 set. 2019.

RIBEIRO JUNIOR, Luiz C. **Inversores Inteligentes em Sistemas Fotovoltaicos para Controle Integrado de Funções Utilizando o OpenDSS**. 141f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2018. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1757/dissertacao_2018132.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 21 mai. 2019.

SILVA JUNIOR, Sillas B. **Análise de operação de sistemas de distribuição utilizando o OpenDSS**. 128f. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010. Disponível em: http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-16112011-103807/?&lang=br Acesso em 13 mai. 2019.

MACHADO, Marcos F. S. O. **Tutorial para Aplicação do Software OpenDSS na Análise de Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. 133f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Maranhão. São Luís, 2017. Disponível em: https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/1593. Acesso em: 21 abr. 2019.

NARUTO, Denise T. **Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema solar Fotovoltaico Conectado à Rede elétrica**. 84f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro Disponível em: http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10020290.pdf. Acesso em 21 abr. 2019.

OLIVEIRA, Fabrício B. R. **Redução de Perdas de Sistemas de Distribuição através do Dimensionamento Ótimo de Bancos de Capacitores via Entropia Cruzada.** 133f. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-05012017-142133/pt-br.php. Acesso em: 13 mai. 2019.

PAYE, Juan C. H. **Cálculo de Perdas Técnicas e não Técnicas nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica usando a Definição de Impedância Equivalente de Perdas.** 98f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará. Belém, 2018. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10347. Acesso em: 28 mai. 2019.

RIBEIRO, Gesiel M. **Impacto da Intermitência dos Sistemas Fotovoltaico na Regulação de Tensão.** 87f. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Industrial Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018. Disponível em: https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2017_1_22/2017_1_22_final.pdf. Acesso em: 28 mai. 2019.

APÊNDICE – MANUAL DE USO DO SOFTWARE OPENDSS

2019

OpenDSS

Tutorial de Uso do Software OpenDSS

ACADÊMICO: MARLON DA SILVA CARNEIRO
ORIENTADOR: EDISON A. C. ARANHA NETO, DR. ENG.
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SUMÁRIO

1 PAINEL PRINCIPAL DO OPENDSS 5
1.1 Estrutura *Menu* 5
1.2 Barra de atalho 6
1.3 Elementos 6
1.4 Janela *Script* 6
***1.5* Janela *Summary* 7**

2 MODELAGEM DE UM SISTEMA EQUILIBRADO SEM A PRESENÇA DE GD 9
2.1 Modelagem do Alimentador 9
2.2 Modelagem das linhas de distribuição 14
2.3 Modelagem dos Transformadores 18
2.4 Modelagem do Banco de Capacitores trifásico aterrado com ligação em paralelo 19
2.5 Modelagem das Cargas 20
2.6 Resultados da Simulação do Sistema de Distribuição Teste em Modo Instantâneo (*Snapshot*) 22
2.7 Resultados da Simulação do Sistema Equilibrado de Distribuição ao longo de 24 horas (*Mode Daily*). 31

3 MODELAGEM DE UM SISTEMA DESEQUILIBRADO SEM A PRESENÇA DE GD NO SOFTWARE OPENDSS 42
3.1 Linha Desequilibrada 42
3.2 Resultados da Simulação do Sistema Desequilibrado de Distribuição ao longo de 24 horas (*Mode Daily*). 43
3.2.1 Tensão na Linha1 43
3.2.2 Potência na Linha1 44
3.2.3 Correntes na Linha1 45
3.2.4 EnergyMeter 45

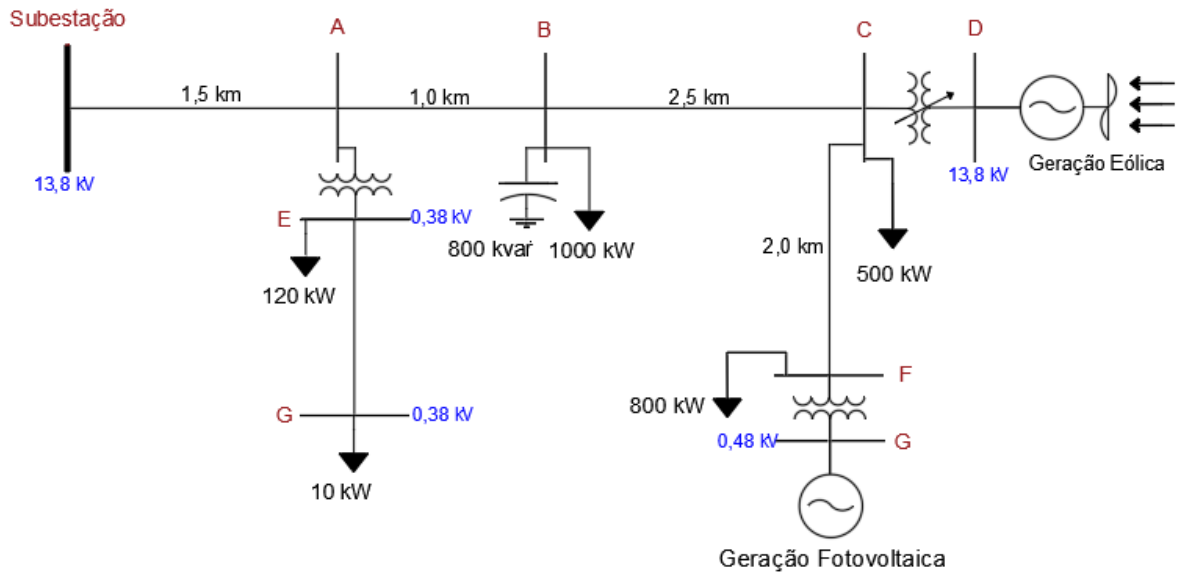
4 MODELAGEM DE UM SISTEMA EQUILIBRADO COM A PRESENÇA DE GD NO SOFTWARE OPENDSS 47
4.1 Modelagem do Gerador Fotovoltaico no OpenDSS 47
4.1.1 Curva da Potência versus Temperatura 48
4.1.2 Curva de Eficiência do Inversor 48
4.1.3 Curva de Irradiação 49
4.1.4 Temperatura do Painel 49
4.1.5 Criação dos Elementos *PVSystem* e *Transformer* 50
4.2 Modelagem do Gerador Eólico no OpenDSS 51
4.2.1 Curva de Potência do Gerador Eólico 52
4.2.2 Regulador de tensão para conexão ao sistema de distribuição 53
4.2.3 Código do Gerador Eólico 53
4.2.4 Código completo do circuito teste com a presença de GD 53
4.3 Resultados da Simulação do Sistema Equilibrado de Distribuição ao longo de 24 horas (*Mode Daily*) com a presença de GD 56
4.3.1 Potência, tensão e os dados de saída do *EnergyMeter* da Subestação ao longo de 24 horas 57
4.3.2 Potência e os dados de saída do *EnergyMeter* do Gerador Eólico ao longo de 24 horas 58

4.3.3 Potência e os dados de saída do *EnergyMeter* do Gerador Fotovoltaico ao longo de 24 horas 61
4.3.4 Comparação entre as perdas no sistema sem e com a presença de GD .. 62
5 SISTEMA DE GEORREFERENCIAMENTO 64
6 REFERÊNCIAS 66

TUTORIAL BÁSICO DE UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE* OPENDSS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A finalidade deste tutorial é apresentar o OpenDSS e conhecer as principais funcionalidades do software para redes de distribuição, especialmente no que se refere a: cálculos de perdas técnicas, verificação dos níveis de queda de tensão nos barramentos e fluxo de potência nas linhas. Para ilustrar de forma didática sua utilização, será utilizado um sistema de distribuição fictício de 8 barras, conforme apresentado na Figura 1. Todas as figuras e tabelas neste tutorial são de elaboração própria do autor.

Figura 1 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição fictício



Para melhor compreensão, o sistema de distribuição proposto será analisado considerando 3 cenários:

- Sistema Equilibrado sem a presença de Geração Distribuída (GD);
- Sistema Desequilibrado sem a presença de GD;
- Sistema Equilibrado com a presença de GD.

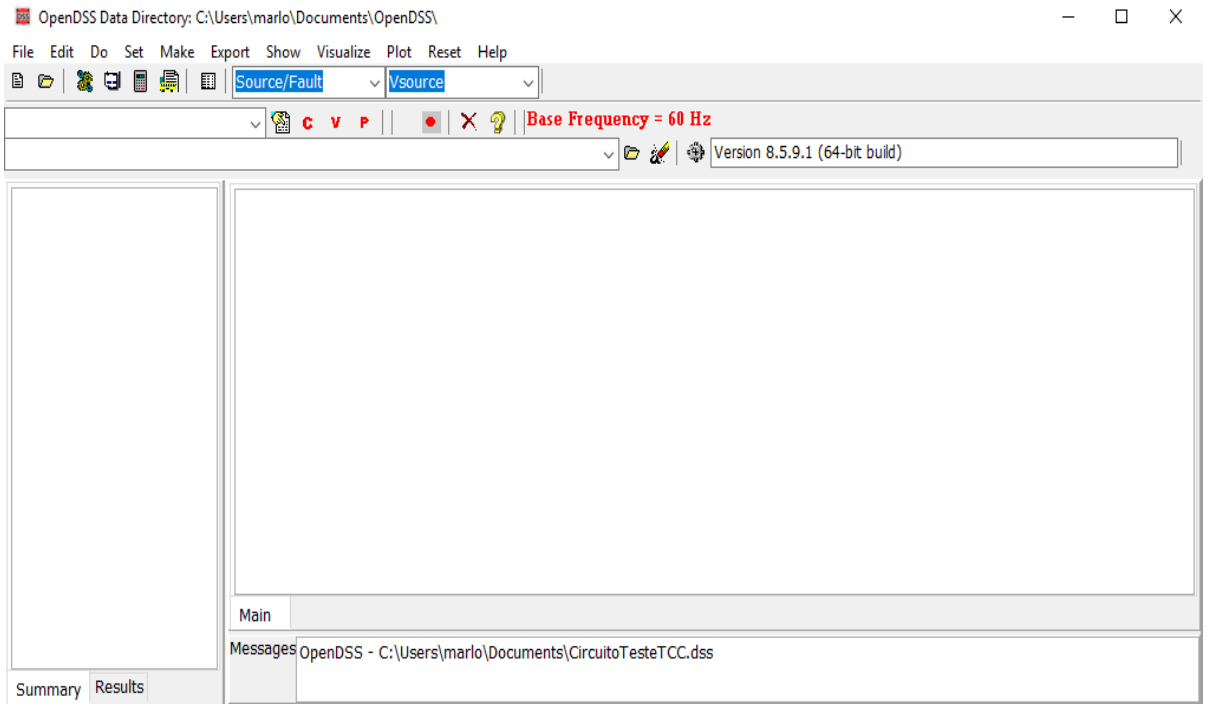
O sistema é composto por um alimentador (Subestação de 13,8 kV), circuitos de média tensão (13,8 kV) e baixa tensão (380/220 V), cargas, banco de capacitores, transformadores, regulador e GD. A carga foi representada pelo modelo de 50% de potência constante e 50% de impedância constante para a parte ativa, e como 100% para a parte reativa de impedância. Este padrão é o mesmo utilizado pela ANEEL (2019) para o cálculo das perdas técnicas regulatórias.

A versão do *software* OpenDSS utilizada neste tutorial foi a *Distribution System Simulator 8.5.9.1*

1 PAINEL PRINCIPAL DO OPENDSS

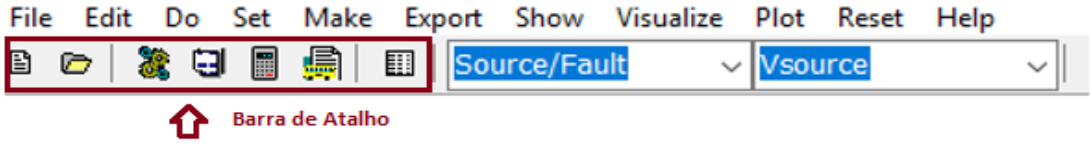
Ao abrir o OpenDSS, o usuário encontra uma janela como a apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Painel frontal do OpenDSS



Na parte superior da janela encontra-se a estrutura de *Menu e* logo abaixo a barra de atalho como mostrado da Figura 3.

Figura 3 - Menu e barras de ferramentas



1.1 Estrutura *Menu*

- *File* – Possibilita criar um novo projeto (*new script),* salvar projeto;
- *Set* – Permite definir qualquer parâmetro de solução;
- *Export* – É possível salvar relatórios em formado *.csv (arquivo de texto com dados separados por vírgula);

- *Show* – Possibilita visualizar os relatórios com os resultados da simulação no editor de texto escolhido pelo usuário;
- *Visualize* – Possibilita visualizar o diagrama do elemento selecionado com suas grandezas elétricas;
- *Plot* – Permite ao usuário a visualização de gráficos de análise do sistema simulado;
- *Help* – Possibilita ao usuário obter informações de qualquer elemento e de suas propriedades utilizado no *software*.

1.2 Barra de atalho

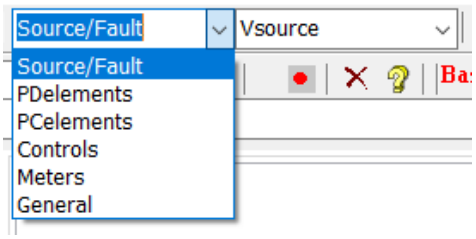
- *Solve* – Possibilita salvar o projeto;
- *New Script* – Cria um novo projeto.

1.3 Elementos

Os elementos são equipamentos elétricos e dispositivos de medição, ou que exerce alguma função específica no programa, geralmente possuem um ou mais terminais e que podem ser modelados no software OpenDSS, por exemplo: *Line, Transformer, Load, EnergyMeter,* etc.

Na Figura 4 é apresentada a ferramenta Elementos, onde nela o usuário tem a possibilidade de selecionar, editar e visualizar o elemento desejado.

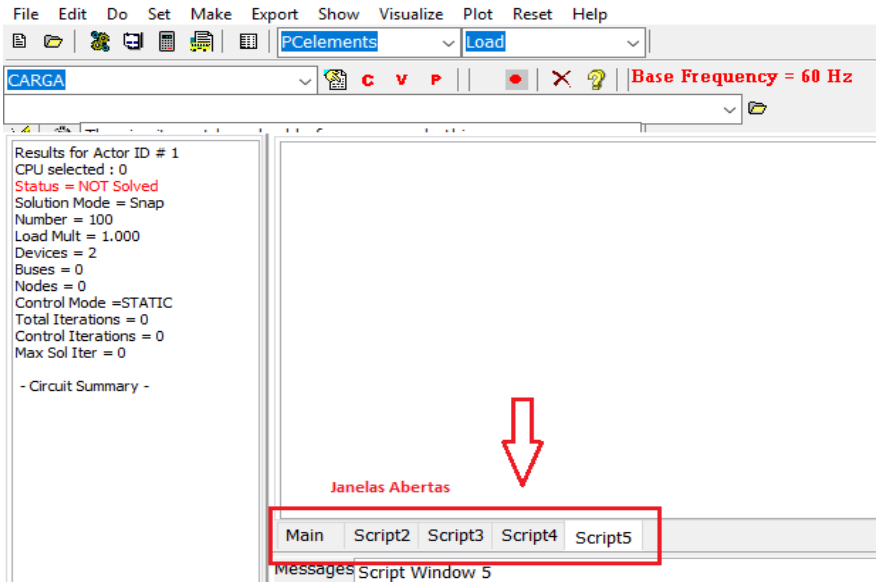
Figura 4 - Elementos



1.4 Janela *Script*

Nesta janela (Figura 5) é possível inserir códigos simultâneo em abas diferentes e escolher qual *Script* vai ser simulado.

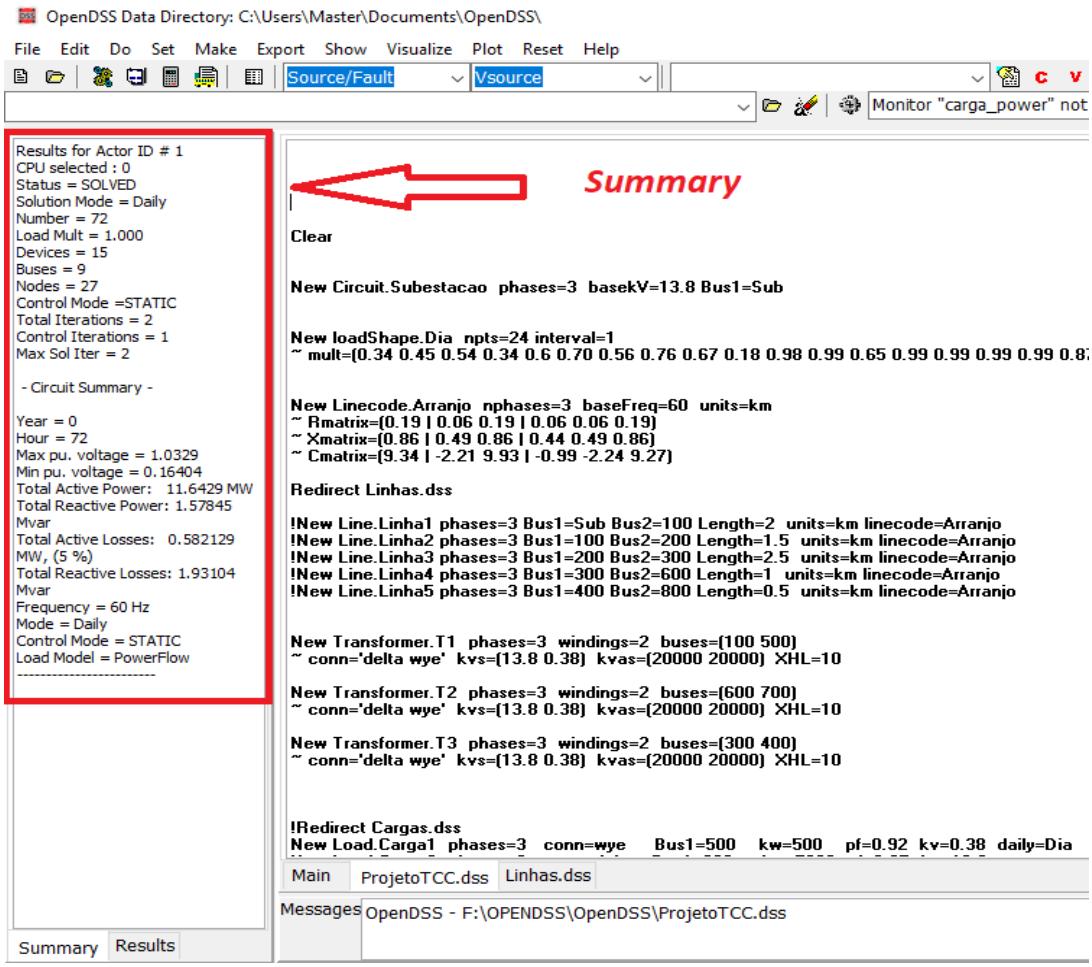
Figura 5 - Janela *Script*



1.5 Janela *Summary*

Na Figura 6 é possível visualizar a janela *Summary*, a qual contém um resumo dos resultados das principais grandezas elétricas como: máxima e mínima tensão do sistema (em pu), máxima potência ativa (MW) e reativa (Mvar) que a subestação está fornecendo, total de perdas ativa (MW) e reativa (Mvar) do sistema simulado, etc.

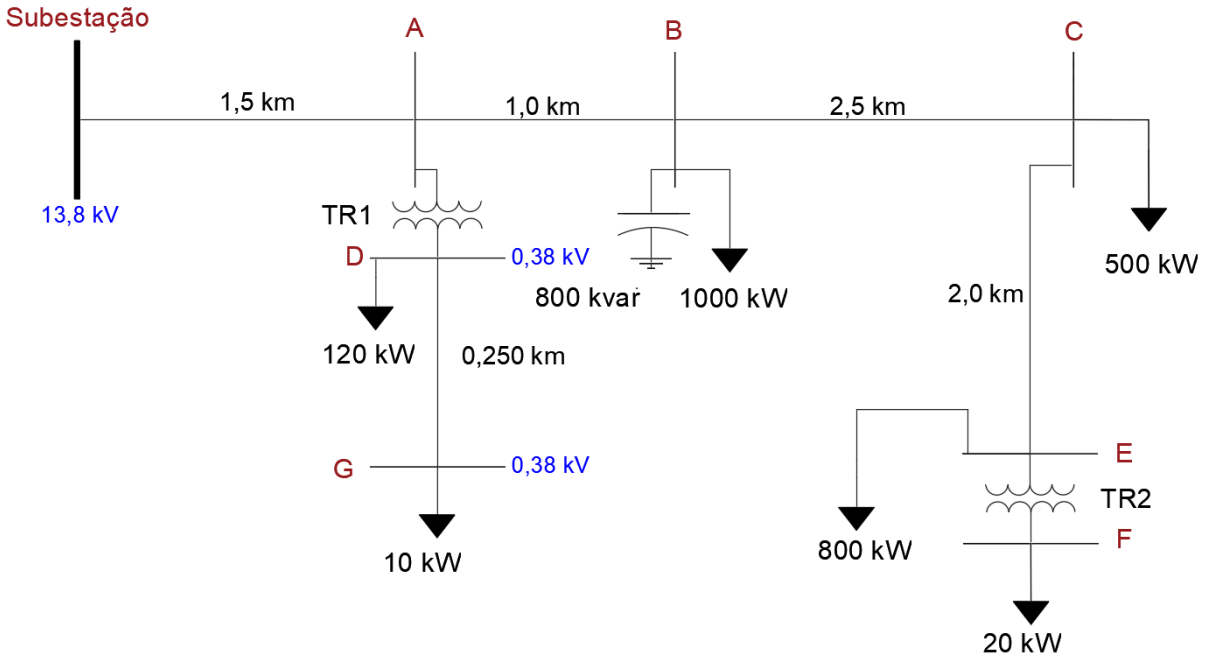
Figura 6 – Janela *Summary*



2 MODELAGEM DE UM SISTEMA EQUILIBRADO SEM A PRESENÇA DE GD

A Figura 7 mostra um diagrama unifilar de um sistema hipotético de distribuição com 7 barras sem a presença de Geração Distribuída.

Figura 7 - Diagrama unifilar hipotético



2.1 Modelagem do Alimentador

O alimentador ou subestação é modelado através do equivalente de Thévenin, uma aproximação matemática para se obter a tensão nominal no alimentador.

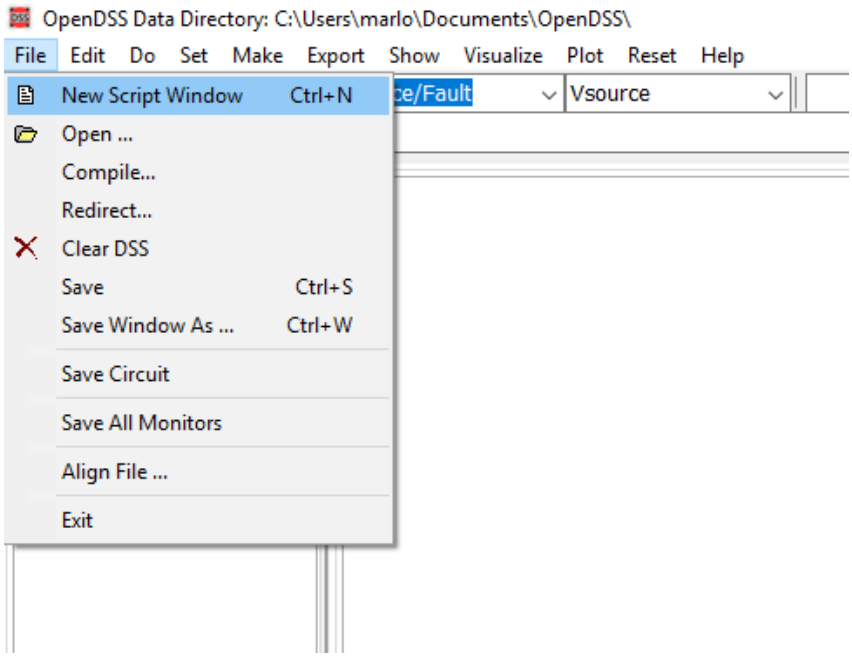
Na Tabela 1 são apresentados os dados de saída do alimentador. Se os valores de frequência e pu do alimentador não são especificados, o *software* OpenDSS considera como padrão 60 Hz e 1,00 pu respectivamente.

Tabela 1 - Dados de saída do alimentador

	bus	phases	basekV	Mvasc3	Mvasc1
Saída do Alimentador	Subestação	3	13.8	20000	21000

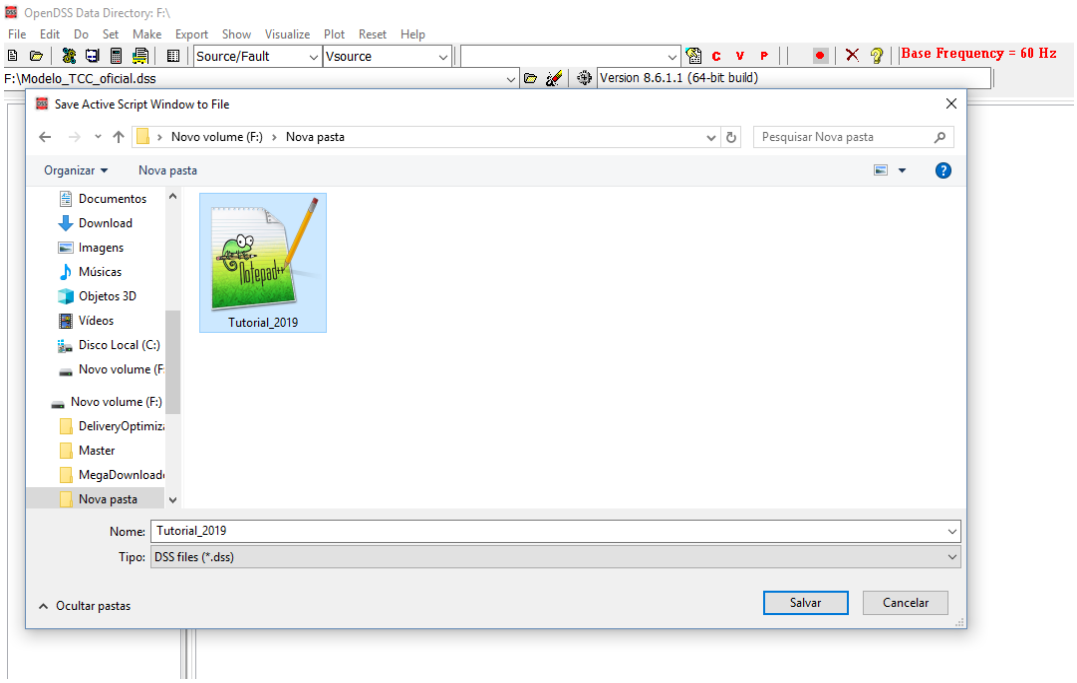
Ao abrir o *software* OpenDSS para criar um projeto, o usuário deve clicar em *New Script Windows* (*File* → *New Script Windows,* ou as teclas Ctrl+N), como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Novo projeto



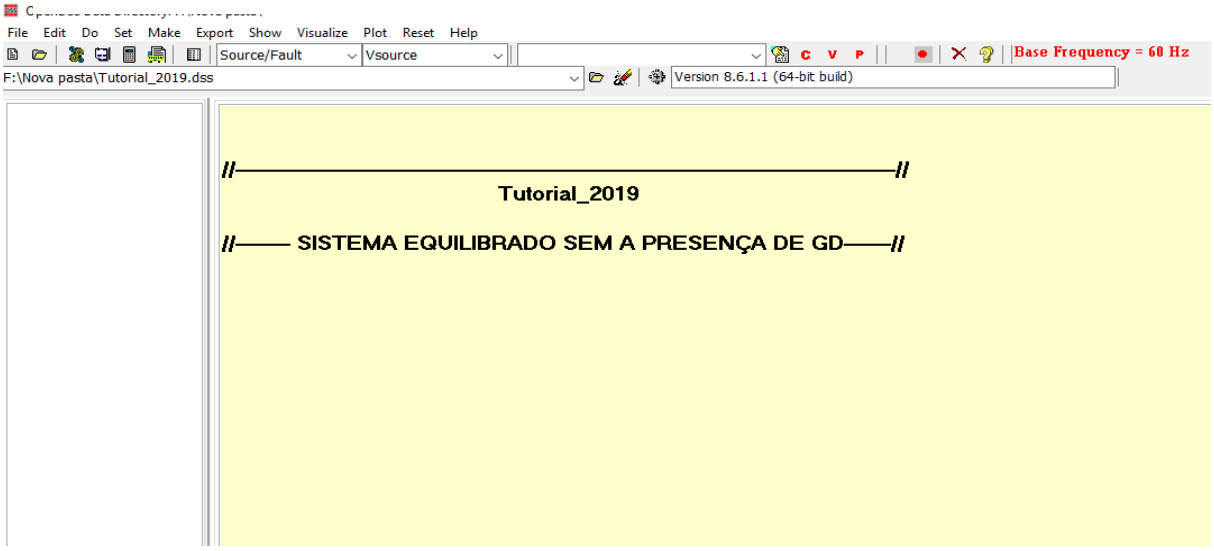
Em seguida o usuário deverá salvar o projeto na pasta de sua escolha (*File* → *Save*, ou as teclas Ctrl+S). O projeto será salvo no formado de arquivo OpenDSS (*.dss). No exemplo do sistema equilibrado da Figura 7, deu-se o nome (Tutorial_2019) como pode-se observar na Figura 9.

Figura 9 - Salvar o projeto



O próximo passo é abrir o arquivo salvo (Tutorial_2019) e aparecerá a tela principal de programação do OpenDSS para modelagem dos equipamentos do sistema a ser analisado, conforme Figura 10.

Figura 10 - Tela Principal



Quando se quer inserir um comentário, basta apenas colocar antes do texto duas barras invertidas (//) ou (!) como observado na figura anterior. Podem ser usadas letras maiúsculas ou minúsculas para implementação do código. Se o comando necessitar de múltiplas linhas, o símbolo (~) pode ser usado nas linhas adicionais (Figura 11).

Ao iniciar qualquer projeto no OpenDSS, o primeiro passo é inicializar o circuito através da modelagem do barramento principal. Com os dados apresentados anteriormente da saída do alimentador é possível escrevê-lo na linguagem do OpenDSS como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Modelagem da saída do alimentador

```
//-------------------------------------------------------------------------------------//
Tutorial_2019
//------- SISTEMA EQUILIBRADO SEM A PRESENÇA DE GD------//

Clear

New Circuit.Subestação   phases=3   bus=subestação   basekV=13.8
~ mvasc3=20000   mvasc1=21000
```

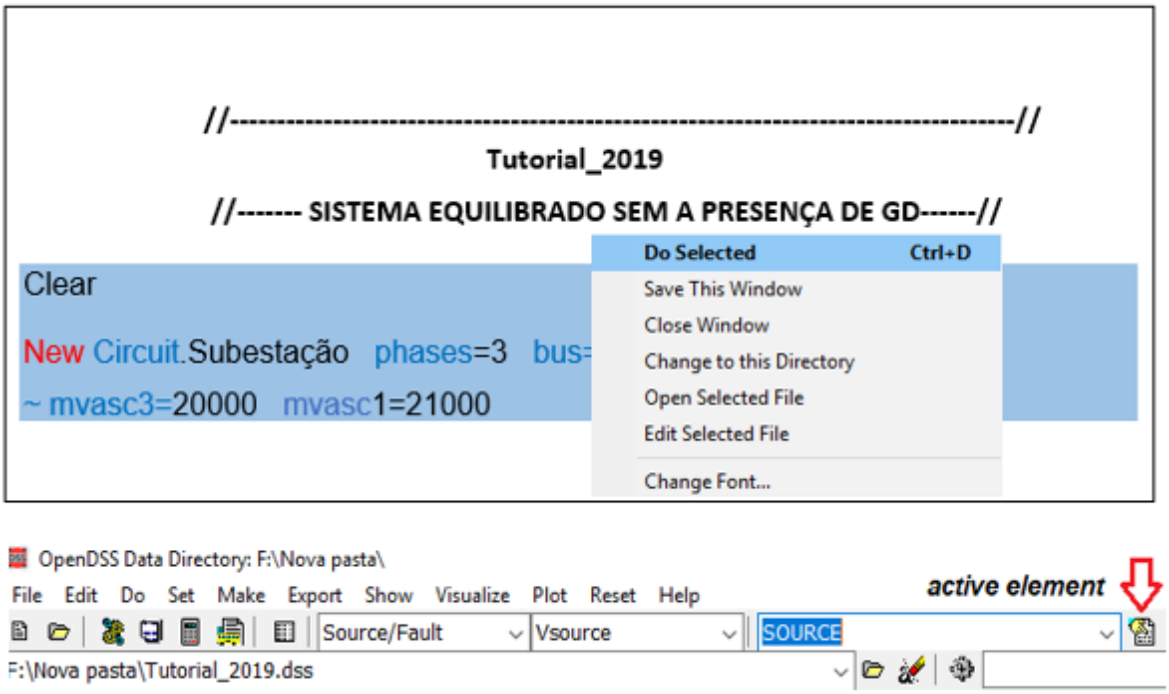
Essas linhas de comandos da figura anterior devem ser interpretadas pelo usuário como:

- *Clear* – limpa a memória do OpenDSS todas as vezes que há simulação de um caso;
- *New* – cria um novo elemento no circuito;
- *Circuit* – responsável por inicializar o circuito, esse comando é o equivalente de Thévenin de dois terminais, com um deles ligado ao neutro (*ground);*
- Subestação – critério definido pelo usuário, ou seja, o nome do barramento principal do circuito será chamado por **Subestação**;
- *Phases=3* – Circuito trifásico;

- *Bus=subestação* – A saída do alimentador está conectada a uma barra chamada subestação;
- *BasekV=13.8* – Tensão nominal da saída do alimentador;
- *Mvasc3=20000* – Potência de curto-circuito trifásica em MVA;
- *Mvasc1=21000* – Potência de curto-circuito monofásica em MVA;

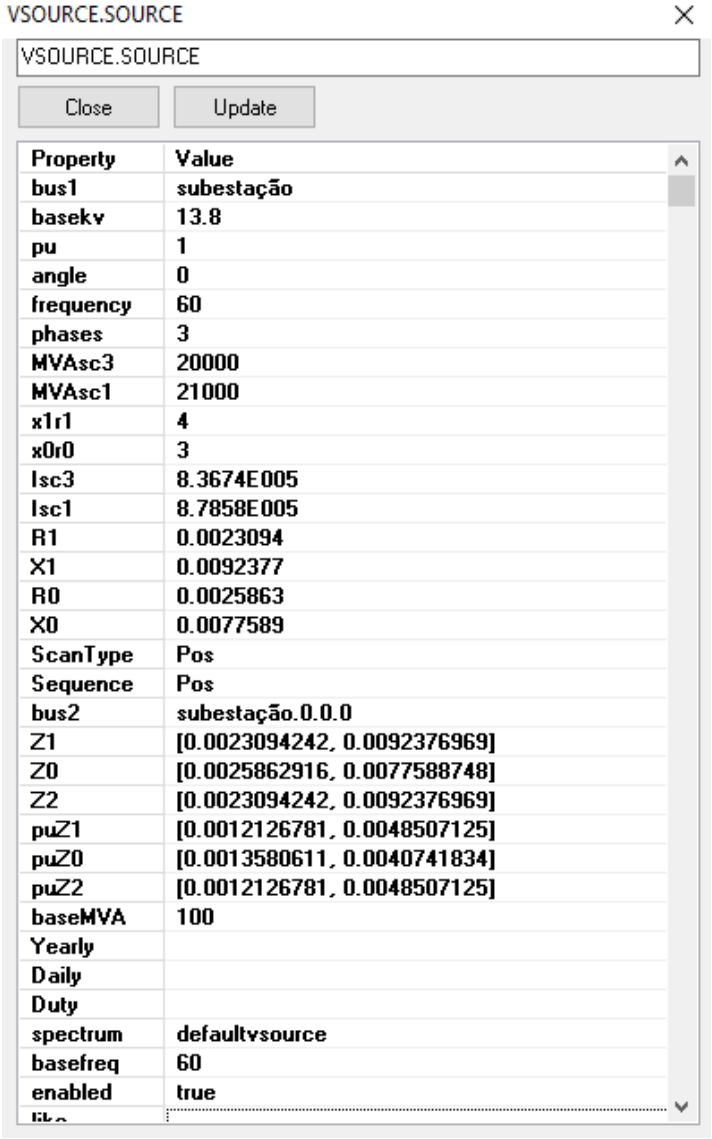
É possível o usuário saber as características do elemento modelado (selecionar as linhas de comando → Botão direito do *mouse* → *Do Selected* → *Source/Fault* → *Vsource* → *SOURCE* → *Active element).* Na Figura 12 são apresentados os passos.

Figura 12 - Passos do comando



Após o usuário clicar em *active element*, deve aparecer uma janela como da Figura 13.

Figura 13 - VSOURCE.SOUCE



VSOURCE.SOURCE

VSOURCE.SOURCE

Close | Update

Property	Value
bus1	subestação
basekv	13.8
pu	1
angle	0
frequency	60
phases	3
MVAsc3	20000
MVAsc1	21000
x1r1	4
x0r0	3
Isc3	8.3674E005
Isc1	8.7858E005
R1	0.0023094
X1	0.0092377
R0	0.0025863
X0	0.0077589
ScanType	Pos
Sequence	Pos
bus2	subestação.0.0.0
Z1	[0.0023094242, 0.0092376969]
Z0	[0.0025862916, 0.0077588748]
Z2	[0.0023094242, 0.0092376969]
puZ1	[0.0012126781, 0.0048507125]
puZ0	[0.0013580611, 0.0040741834]
puZ2	[0.0012126781, 0.0048507125]
baseMVA	100
Yearly	
Daily	
Duty	
spectrum	defaultvsource
basefreq	60
enabled	true

Nesta janela é possível visualizar as características do alimentador como: barra a que o mesmo está conectado, tensão nominal, frequência, correntes de curto circuito, impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, etc.

2.2 Modelagem das linhas de distribuição

Para melhor organização do código das linhas, é conveniente usar a ferramenta *Linecode* para armazenar as características elétricas de linhas idênticas. Desta forma quando o usuário criar uma linha, apenas será necessário declarar o *Linecode* correspondente a característica da mesma.

Na Tabela 2 são apresentados os dados das linhas de distribuição e os arranjos que serão utilizados na ferramenta *Linecode*.

Tabela 2 - Dados das linhas de distribuição

Segmento de Linha	**Barra 1**	**Barra 2**	**Fases**	**R1/R0 (Ω/km)**	**X1/X0 (Ω/km)**	**Comprimento (km)**
Linha 1	Subestação	A	3	0,222/ 0,18	0,402/ 0,48	1,5
Linha 2	A	B	3	0,222/ 0,18	0,402/ 0,48	1,0
Linha 3	B	C	3	0,705/ 0,45	0,450/ 0,35	2,5
Linha 4	C	E	3	0,705/ 0,45	0,450/ 0,35	2,0
Linha 5	D	G	1	0,443	0,428	0,25
Linecode	Arranjo 1		Linha 1			
			Linha 2			
	Arranjo 2		Linha 3			
			Linha 4			

Com a tela do OpenDSS aberta, o primeiro passo é declarar o comando *Linecode* e logo em seguida as linhas (*Line)*, conforme Figura 14.

Figura 14 - Modelagem das linhas de distribuição

```
New Linecode.Arranjo1   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix=[0.18 |  0  0.222 | 0  0  0.222]
~ xmatrix=[0.40 | 0  0.402 |  0  0  0.402]
~ cmatrix=[2.74 | 0  2.96 | 0  0  2.74]
New Linecode.Arranjo2   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix=[0.45 |  0  0.705 | 0  0  0.705]
~ xmatrix=[0.35 | 0  0.450 |  0  0  0.450]
~ cmatrix=[2.74 | 0  2.96 | 0  0  2.74]


New Line.Linha1   phases=3   bus1=Subestação   bus2=A   Linecode=Arranjo1
~ length=1.5   units=km

New Line.Linha2   phases=3   bus1=A   bus2=B   Linecode=Arranjo1
~ length=1.0   units=km

New Line.Linha3   phases=3   bus1=B   bus2=C   Linecode=Arranjo2
~ length=2.5    units=km

New Line.Linha4   phases=3   bus1=C   bus2=E   Linecode=Arranjo2
~ length=2.0     units=km

New Line.Linha5   phases=1   bus1=D   bus2=G   R1=0.443   X1=0.428
~ length=0.250   units=km
```

No comando *Linecode* da figura anterior tem-se:

- *New Linecode.*Arranjo1 – Neste comando são armazenadas as características elétricas das linhas 1 e 2 como: Resistência e Reatância de sequência positiva e zero.
- *New Linecode.*Arranjo2 – Neste comando são armazenadas todas as características elétricas das linhas 3 e 4 como: Resistência e Reatância de sequência positiva e zero.

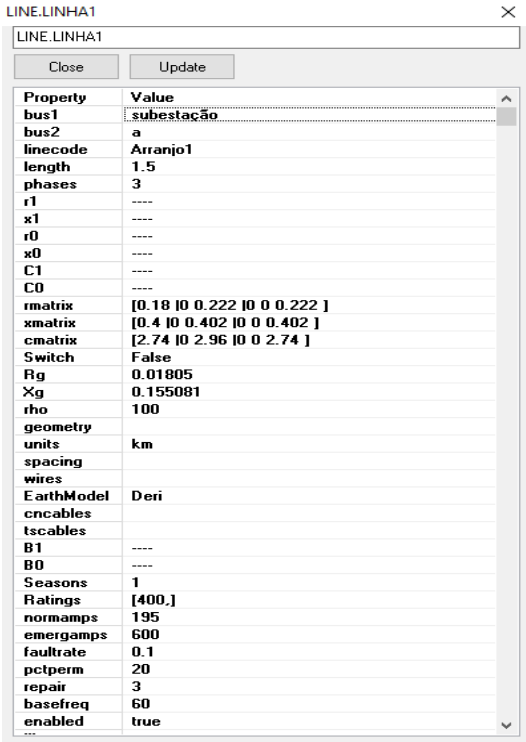
Na declaração das linhas, as informações elétricas indispensável para a simulação estão inseridas no seu Arranjo declarado. Se houve a necessidade de declarar mais linhas no sistema, e esta linha possuir as mesmas características elétricas dos Arranjos já declarados, não há necessidade de criar um novo Arranjo.

No comando *Line* da figura anterior temos:

- *New Line.*Linha1 – Arranjo1, linha trifásica equilibrada, conectada entre a barra subestação e a barra A, 1500 metros de comprimento;
- *New Line.*Linha2 – Arranjo1, linha trifásica equilibrada, conectada entre a barra A e a barra B, 1000 metros de comprimento;
- *New Line.*Linha3 – Arranjo2, linha trifásica equilibrada, conectada entre a barra B e a barra C, 2500 metros de comprimento;
- *New Line.*Linha4 – Arranjo4, linha trifásica equilibrada, conectada entre a barra C e a barra E, 2000 metros de comprimento;
- *New Line.*Linha5 – Linha monofásica equilibrada, conectada entre a barra D e a barra G, 250 metros de comprimento, resistência (R1=0,444Ω/km), reatância (X1=0,428Ω/km).

Semelhantemente, pode-se visualizar na Figura 15 as características elétricas da linha selecionada (selecionar as linhas de comando → Botão direito do *mouse → Do Selected → PDelements → Line → Linha1 → active element),* assim como também de qualquer outro equipamento modelado.

Figura 15 - VSOURCE.SOUCE



Nesta janela é possível visualizar as características da Linha1 como: as barras que a mesma está conectada, as impedâncias de sequência positiva e zero, fase, frequência, etc.

2.3 Modelagem dos Transformadores

Na Tabela 3 são apresentados os dados dos transformadores trifásicos de dois enrolamentos.

Tabela 3 - Dados dos Transformadores

Código	**TR1**	**TR2**
Número de fases	3	3
Número de enrolamentos	2	2
Potência nominal (kVA)	150	150
Tensão Primária (kV)	13,8	13,8
Tensão Secundária (kV)	0,38	0,38
Conexão	delta/estrela	delta/estrela
XLH (%)	2	2
Perda total (%)	0,5	0,5
Perda em vazio (%)	0,2	0,2
Perdas de magnetização (%)	0,5	0,5

Com os dados apresentados anteriormente do transformador é possível escrevê-lo na linguagem do OpenDSS, como observado na Figura 16.

Figura 16 - Modelagem dos Transformadores

```
New Transformer.TRAFO1 phases=3 windings=2 Xhl=2 %loadloss=0.5 %noloadloss=0.5  %imag=0.5
~ wdg=1  bus1=A  conn=delta  kV=13.8  kVA=150  tap=1
~ wdg=2  bus1=D  conn=wye  kV=0.38  kVA=150  tap=1

New Transformer.TRAFO2 phases=3 windings=2 Xhl=2 %loadloss=0.5 %noloadloss=0.5  %imag=0.5
~ wdg=1  bus1=E  conn=delta  kV=13.8  kVA=150  tap=1
~ wdg=2  bus1=F  conn= wye  kV=0.38  kVA=150  tap=1
```

Com relação a modelagem dos transformadores da figura anterior tem-se:

- *New Transformer.*TRAFO1 – Cria um elemento transformador no circuito chamado TRAFO1;
- *New Transformer.*TRAFO2 – Cria um elemento transformador no circuito chamado TRAFO2;
- *Phases*=3 – Transformador trifásico;
- *Windings=2* – Transformador de 2 (dois) enrolamentos;
- *Xhl=2* – Indutância de dispersão de 2%;
- *%loadloss*=0.5 – Perda total com carga nominal de 0,5%;
- *%noloadloss*=0.5 – Percentual de perdas a vazio de 0,5%;
- *%imag*=0.5 – Perda devido a magnetização de 0,5%;
- *Wdg=1* – Primário do transformador: conexão delta, tensão de 13,8 kV, potência nominal de 150 kVA e posição do tap em 1 (um) pu;
- *Wdg=2* – Secundário do transformador: conexão estrela, tensão de 380 V, potência nominal de 150 kVA e posição do tap em 1 (um) pu;

2.4 Modelagem do Banco de Capacitores trifásico aterrado com ligação em paralelo

Na Tabela 4 são apresentados os dados do banco de capacitores.

Tabela 4 - Dados do Banco de Capacitores

	Bus1	**Phases**	**Tensão base (kV)**	**Potência Injetada (kvar)**
Banco de Capacitores	Subestação	3	0,38	800

Na Figura 17 é apresentada a modelagem em linguagem OpenDSS do banco de capacitores.

Figura 17- Modelagem do Banco de Capacitores

```
New Capacitor.BANCO_CAPACITORES  phases=3  bus1=B  kV=13.8  kVA=800
```

Na modelagem da figura anterior tem-se:

- *New Capacitor.*BANCO_CAPACITORES – Cria um elemento Banco de Capacitores chamado BANCO_CAPACITORES;
- *Phases*=3 – Banco de Capacitores trifásico;
- *Bus*=B – Conectado a barra B;
- *KV*=13.8 – Tensão de linha;
- *KVA=800* – Potência reativa injetada na barra.

2.5 Modelagem das Cargas

Na Tabela 5 são apresentados os dados das cargas.

Tabela 5 - Dados das Cargas

	Fases	Conexão	Tensão Nominal (kV)	Modelo de Carga	Potência (kW)	Fator de Potência
CARGA1	1	Estrela	0,22	ZIP	10	0,90
CARGA2	3	Delta	13,8	ZIP	1000	0,90
CARGA3	3	Delta	13,8	ZIP	500	0,90
CARGA4	3	Delta	13,8	ZIP	800	0,90
CARGA5	3	Delta	13,8	ZIP	20	0,90
CARGA6	3	Delta	13,8	ZIP	120	0,90

Na Figura 18 é apresentada a modelagem em linguagem OpenDSS das cargas.

Figura 18 - Modelagem das Cargas

```
New Load.CARGA1  phases=1 bus1=G  conn=wye   model=8  kV=0.22  kW=10    pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA2  phases=3 bus1=B  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=1000 pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA3  phases=3 bus1=C  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=500  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA4  phases=3 bus1=E  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=800  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA5  phases=3 bus1=F  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=20   pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA6  phases=3 bus1=D  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=120  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
```

Na modelagem da CARGA1 (a modelagem das outras cargas é feita de modo semelhante) da figura anterior tem-se:

- *New Load.*CARGA1 – Cria um elemento Carga chamado CARGA1;
- *Phases=1* – Circuito monofásico;
- *Bus1=G* – Conectado a barra G;
- *Conn=wye* – Carga conectada em estrela;
- *Model=8* – Representação do modelo da carga (ZIP);
- *Zipv=(0.5, 0, 0.5,1, 0, 0, 0.90)* – ZIP com 50% de potência constante e 50% de impedância constante para a parte ativa, e como 100% de impedância constante para a parte reativa;
- *KV=13.8* – Tensão nominal da carga;
- *KW=10* – Potência nominal da carga;
- *Pf=0.90* – Fator de potência da carga.

2.6 Resultados da Simulação do Sistema de Distribuição Teste em Modo Instantâneo (*Snapshot*)

Após o usuário modelar todos os elementos do sistema no *software* OpenDSS (Figura 19), o próximo passo é a obtenção dos resultados da simulação.

Figura 19 - Modelagem do Sistema

```
Clear

New Circuit.Subestação  phases=3  bus=subestação  basekv=13.8
~ mvasc3=20000  mvasc1=21000

New Linecode.Arranjo1  nphases=3  baseFreq=60
~ rmatrix=[0.18 | 0 0.222 | 0 0 0.222]
~ xmatrix=[0.4 | 0 0.402 | 0 0 0.402 ]
~ cmatrix=[2.74 | 0 2.96 | 0 0 2.74]  units=km  normamps=195
New Linecode.Arranjo2  nphases=3  baseFreq=60
~ rmatrix=[0.45 | 0 0.705 | 0 0 0.705]
~ xmatrix=[0.35 | 0 0.450 | 0 0 0.450 ]
~ cmatrix=[2.74 | 0 2.96 | 0 0 2.74]   units=km  normamps=195

New Line.Linha1  phases=3  bus1=Subestação  bus2=A  Linecode=Arranjo1
~ length=1.5  units=km
New Line.Linha2  phases=3  bus1=A  bus2=B  Linecode=Arranjo1
~ length=1.0  units=km
New Line.Linha3  phases=3  bus1=B  bus2=C  Linecode=Arranjo2
~ length=2.5  units=km
New Line.Linha4  phases=3  bus1=C  bus2=E  Linecode=Arranjo2
~ length=2.0  units=km
New Line.Linha5  phases=1  bus1=D  bus2=G  R1=0.443  X1=0.428
~ length=0.250   units=km

New Transformer.TRAFO1  phases=3  windings=2  Xhl=2  %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
~ wdg=1  bus=A  conn=delta  kv=13.8  kVA=150  tap=1
~ wdg=2  bus=D  conn=wye  kv=0.38  kVA=150  tap=1
New Transformer.TRAFO2  phases=3  windings=2  Xhl=2  %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
~ wdg=1  bus=E  conn=delta  kv=13.8  kVA=150  tap=1
~ wdg=2  bus=F  conn=wye  kv=0.38  kVA=150  tap=1

New Capacitor.BANCO_CAPACITORES  phases=3  bus1=B  kvar=800 kv=13.8

!New Load.CARGA1  bus1=G phases=1  conn=wye  model=8  kv=0.22  kW=10  pf=0.9
!~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.90)
New Load.CARGA2  bus1=B phases=3  conn=delta  model=8  kv=13.8  kW=1000  pf=0.9
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA3  bus1=C phases=3  conn=delta  model=8  kv=13.8  kW=500 pf=0.9
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.9)
New Load.CARGA4 bus1=E phases=3  conn=delta  model=8  kv=13.8  kW=800 pf=0.9
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.9)
New Load.CARGA5 bus1=F phases=3  conn=delta  model=8  kv=0.38  Kw=20  pf=0.9
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.9)
 New Load.CARGA6 bus1=D phases=3  conn=delta  model=8  kv=0.38  Kw=120  pf=0.90
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.90)
```

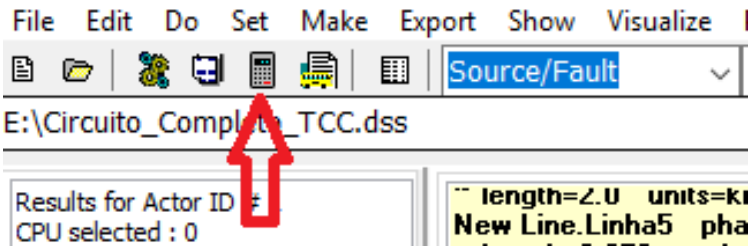
Antes da realização da simulação, se o usuário preferir, também poderá visualizar os valores de tensão em pu. Neste caso será necessário acrescentar duas linhas de código abaixo dos elementos modelados, conforme a Figura 20. Nestas linhas, através do comando *Set voltagebases e Calcvoltagebases,* são configurados os valores de tensão base para o sistema. No exemplo do circuito teste foram inseridos dois valores (13,8 kV e 380 V).

Figura 20 - Configuração dos valores de tensão de base do sistema

```
New Load.CARGA5  phases=3 bus1=F  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=20    pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA6  phases=3 bus1=D  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=120   pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)

Set voltagebases=[13.8  0.38]
Calcvoltagebases
```

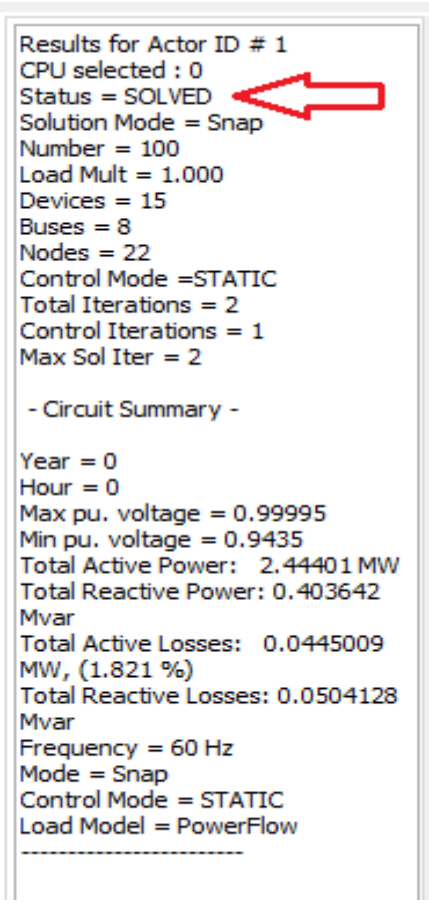
Para iniciar o processo de simulação, o primeiro passo é selecionar o código e clicar em *Do Selected* através do atalho (Ctrl+A e Ctrl+D). Na sequência é realizada a solução do circuito escolhido através do comando *solve,* que fica localizado na barra de ferramentas, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Comando *Solve*



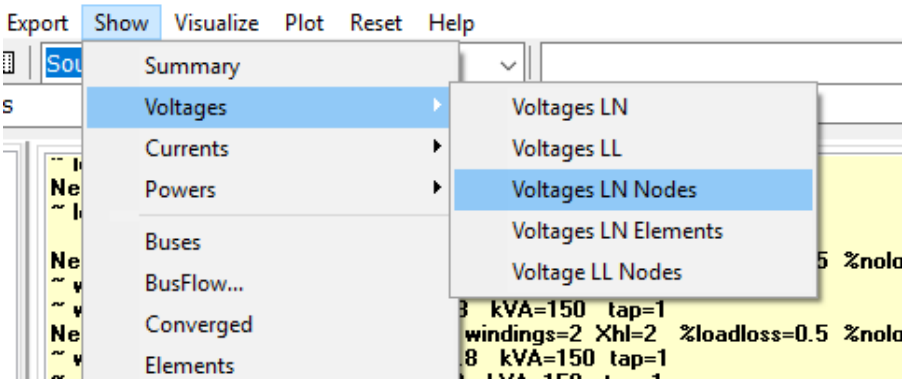
Logo em seguida será possível visualizar na janela *Summary* um resumo dos resultados da simulação (Figura 22). Aparecerá *SOLVED* na linha de *Status*, isso indicará que não houve nenhum erro no código e a simulação ocorreu com sucesso.

Figura 22 - Janela *Summary*



Existem várias maneiras de visualizar o resultado no OpenDSS, como: menu *Export*, menu *Show*, menu *Visualize.* Por exemplo, se o usuário desejar visualizar os valores de tensão nas barras através no menu *Show*, deverá seguir seguintes os passos (Show → *Voltages LN Nodes*), conforme a Figura 23.

Figura 23 - *Voltages LN Nodes*



Após o usuário clicar em *Voltages LN Nodes* será gerado um relatório em arquivo *.txt, conforme pode ser observado Figura 24.

Figura 24 – Relatório das Tensões de Linha (VLL) e Fase (VLN) nas barras

LINE-GROUND and LINE-LINE VOLTAGES BY BUS & NODE

Bus	Node	VLN (kV)	Angle	pu	Base kV	Node-Node	VLL (kV)	Angle	pu
SUBESTAçãO	1	7.967 /_	0.0	0.99995	13.800	1-2	13.799 /_	30.0	0.99995
-	2	7.967 /_	-120.0	0.99995	13.800	2-3	13.799 /_	-90.0	0.99995
-	3	7.967 /_	120.0	0.99995	13.800	3-1	13.799 /_	150.0	0.99995
A	1	7.9297 /_	-0.4	0.99526	13.800	1-2	13.729 /_	29.6	0.99483
-	2	7.9233 /_	-120.4	0.99446	13.800	2-3	13.724 /_	-90.4	0.99446
-	3	7.9233 /_	119.6	0.99446	13.800	3-1	13.729 /_	149.6	0.99488
B	1	7.9068 /_	-0.7	0.9924	13.800	1-2	13.685 /_	29.3	0.9917
-	2	7.8964 /_	-120.7	0.99108	13.800	2-3	13.677 /_	-90.7	0.99109
-	3	7.8964 /_	119.3	0.99109	13.800	3-1	13.687 /_	149.3	0.99178
C	1	7.8217 /_	-0.8	0.98171	13.800	1-2	13.501 /_	29.1	0.97831
-	2	7.7698 /_	-120.8	0.9752	13.800	2-3	13.458 /_	-90.8	0.97522
-	3	7.7698 /_	119.2	0.97519	13.800	3-1	13.504 /_	149.3	0.97858
E	1	7.7794 /_	-0.9	0.97641	13.800	1-2	13.409 /_	29.0	0.97166
-	2	7.707 /_	-120.8	0.96731	13.800	2-3	13.349 /_	-90.8	0.96733
-	3	7.7069 /_	119.1	0.9673	13.800	3-1	13.414 /_	149.3	0.97203
D	1	0.21568 /_	-31.2	0.98305	0.380	1-2	0.3736 /_	-1.2	0.98316
-	2	0.21566 /_	-151.2	0.983	0.380	2-3	0.37344 /_	-121.2	0.98274
-	3	0.21558 /_	88.8	0.98264	0.380	3-1	0.37346 /_	118.8	0.9828
G	1	0.21568 /_	-31.2	0.98305	0.380				
F	1	0.21281 /_	-30.9	0.96999	0.380	1-2	0.3691 /_	-1.0	0.97131
-	2	0.21273 /_	-151.2	0.96964	0.380	2-3	0.36732 /_	-121.1	0.96664
-	3	0.21178 /_	89.0	0.96531	0.380	3-1	0.36746 /_	119.2	0.96699

Outra maneira de se obter o resultado é diretamente do elemento selecionado através no menu *Visualize.* Nesta opção o usuário deve primeiro escolher qual elemento deve ser visualizado, conforme os passos apresentados na Figura 25. A Figura 26 apresenta o resultado da simulação.

Figura 25 - Menu *Visualize*

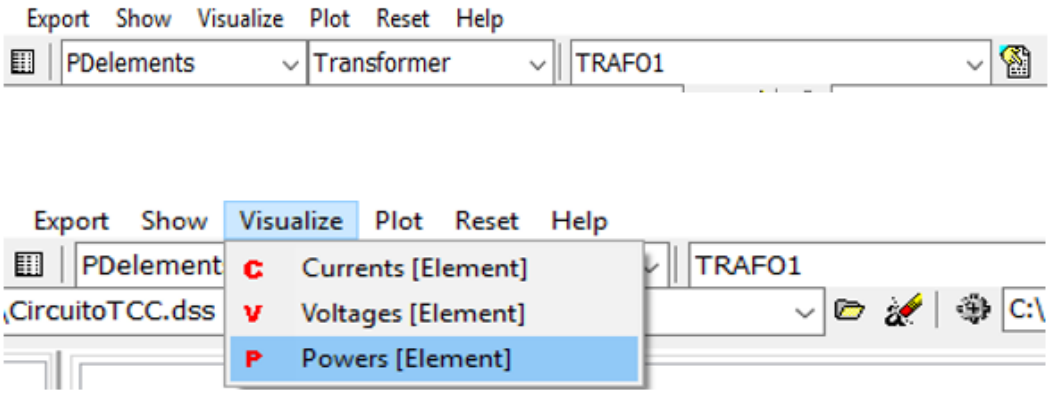
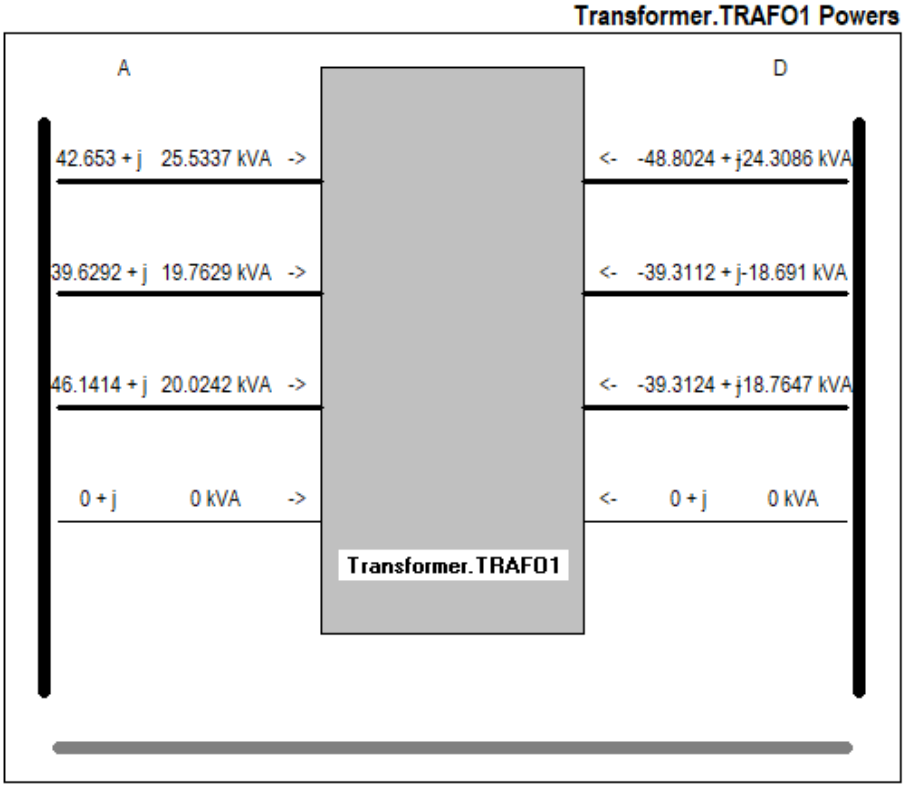


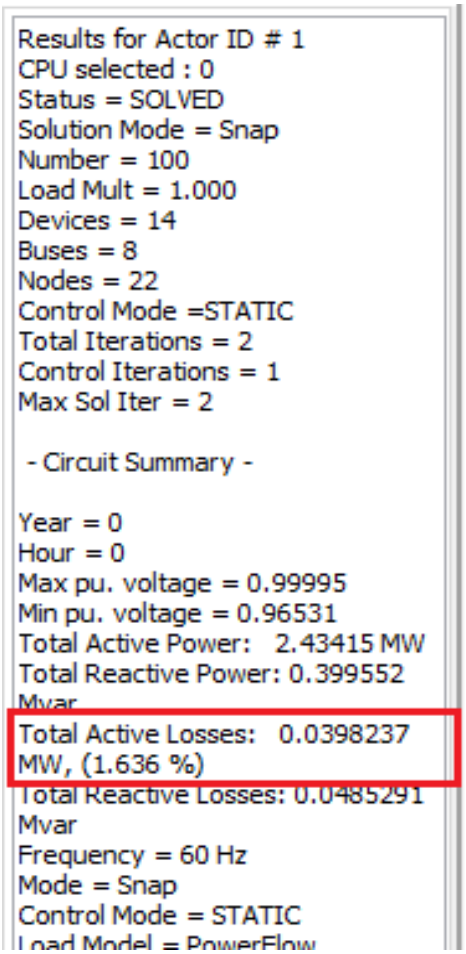
Figura 26 – Relatório das Potências nas Fases do Transformador 1 (TRAFO1)



Através da figura anterior é possível visualizar o fluxo de potência de entrada (barra A) e de saída (barra D) no TRAFO1. A potência total de saída geralmente é sempre menor que a potência total de entrada devido às perdas técnicas no equipamento.

O valor das perdas, assim como seu percentual, pode ser visualizado através da janela *Summary,* como observado na Figura 27.

Figura 27 – Perdas Técnicas no Sistema



```
Results for Actor ID # 1
CPU selected : 0
Status = SOLVED
Solution Mode = Snap
Number = 100
Load Mult = 1.000
Devices = 14
Buses = 8
Nodes = 22
Control Mode =STATIC
Total Iterations = 2
Control Iterations = 1
Max Sol Iter = 2

 - Circuit Summary -

Year = 0
Hour = 0
Max pu. voltage = 0.99995
Min pu. voltage = 0.96531
Total Active Power:   2.43415 MW
Total Reactive Power: 0.399552
Mvar
Total Active Losses:   0.0398237
MW, (1.636 %)
Total Reactive Losses: 0.0485291
Mvar
Frequency = 60 Hz
Mode = Snap
Control Mode = STATIC
Load Model = PowerFlow
```

Outra maneira de visualizar as perdas é através do comando *Show* seguindo os seguintes passos: *Show* → *Powers* → *Powers kVA Elem.* É gerado um relatório que contém o fluxo de potência nos elementos do circuito, e na última linha a informação da perda total no sistema, conforme Figura 28.

Figura 28 - Relatório de Potências

```
Power Conversion Elements

  Bus       Phase      kW    +j   kvar          kVA          PF

ELEMENT = "Load.CARGA1"
G               1        9.4 +j     4.3        10.3        0.9086
G               0        0.0 +j     0.0         0.0        1.0000
  TERMINAL TOTAL  ..      9.4 +j       4.3        10.3        0.9086

ELEMENT = "Load.CARGA2"
B               1      330.9 +j   158.9       367.0        0.9015
B               2      330.3 +j   158.7       366.4        0.9014
B               3      330.4 +j   158.5       366.5        0.9016
  TERMINAL TOTAL  ..    991.5 +j     476.1      1099.9        0.9015

ELEMENT = "Load.CARGA3"
C               1      163.8 +j    77.6       181.3        0.9038
C               2      162.3 +j    77.0       179.7        0.9035
C               3      162.6 +j    76.7       179.8        0.9044
  TERMINAL TOTAL  ..    488.8 +j     231.3       540.8        0.9039

ELEMENT = "Load.CARGA4"
E               1      260.9 +j   122.6       288.3        0.9050
E               2      257.5 +j   121.4       284.7        0.9045
E               3      258.2 +j   120.7       285.0        0.9059
  TERMINAL TOTAL  ..    776.6 +j     364.8       858.0        0.9051

ELEMENT = "Load.CARGA5"
F               1        6.5 +j     3.0         7.2        0.9049
F               2        6.5 +j     3.0         7.1        0.9059
F               3        6.4 +j     3.0         7.1        0.9057
  TERMINAL TOTAL  ..     19.4 +j       9.1        21.4        0.9055

ELEMENT = "Load.CARGA6"
D               1       39.2 +j    18.6        43.4        0.9039
D               2       39.3 +j    18.7        43.5        0.9030
D               3       39.3 +j    18.8        43.6        0.9024
  TERMINAL TOTAL  ..    117.8 +j      56.0       130.5        0.9031

Total Circuit Losses =    40.3 +j    49.4
```

O usuário também pode visualizar um gráfico de tensão em pu em função da distância das linhas de distribuição através do comando *EnergyMeter*. Este comando tem como função fazer medições em um determinado elemento ou em ponto específico fixado pelo usuário. Quando o *EnergyMeter* é colocado no início do sistema, ou seja, na subestação ou na linha que está conectada a mesma, é possível

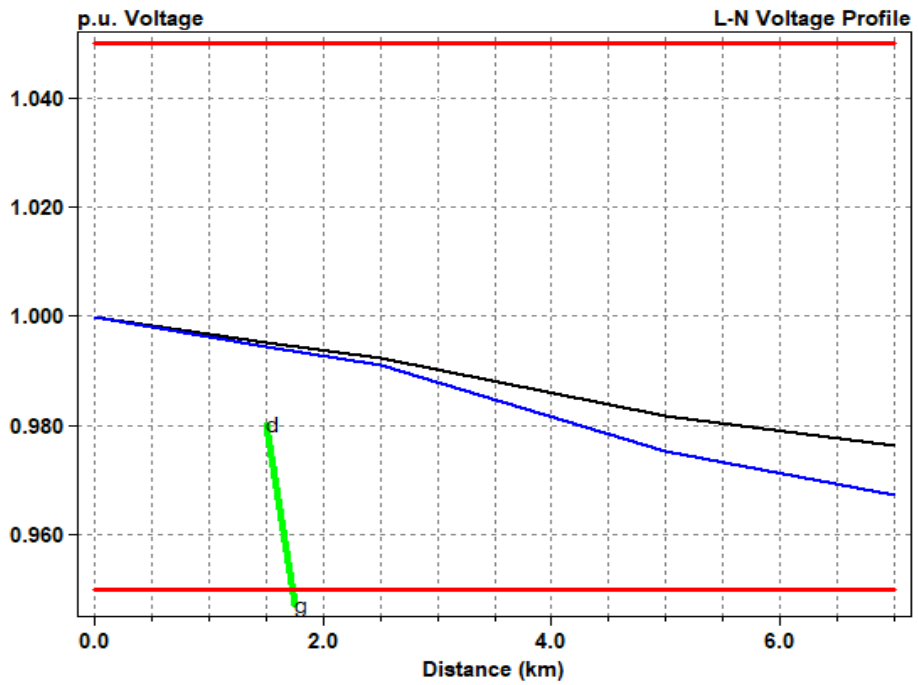
realizar medições em todas as linhas de distribuição do circuito. Para utilizar esta função é necessário acrescentar algumas linhas de código como apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Plot Profile

```
New Load.CARGA5   phases=3 bus1=F   conn=delta   model=8   kV=13.8   kW=20     pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA6   phases=3 bus1=D   conn=delta   model=8   kV=13.8   kW=120    pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)

Set voltagebases=[13.8  0.38]
Calcvoltagebases

New EnergyMeter.Linha1   element=Line.Linha1   terminal=1
solve
plot profile
```

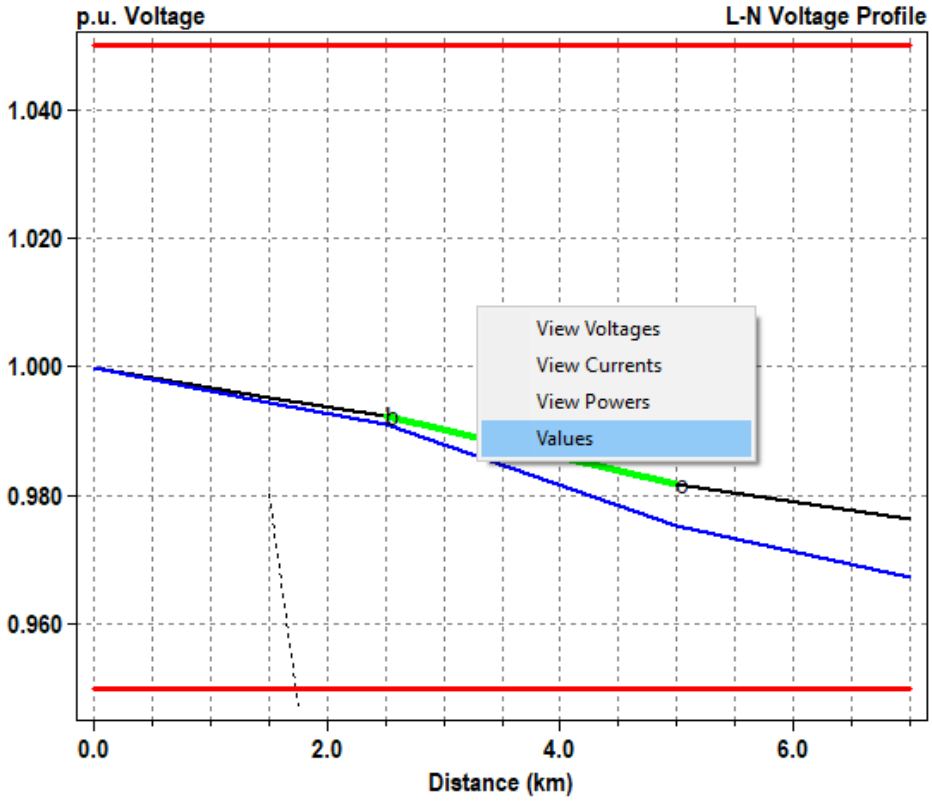
Em seguida, o usuário deve seguir os seguintes passos: Ctrl+A e Ctrl+D, então será mostrado o gráfico das tensões ao longo das linhas, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 - Tensão em pu em Função da Distância



Como pode ser observado no gráfico da figura anterior, o comprimento total das linhas é simplesmente a distância do barramento principal até o final da linha mais distante da subestação. Se o usuário quiser visualizar as grandezas elétrica presentes em qualquer linha, deve seguir os passos: botão direito do mouse em cima da linha escolhida → *Values,* conforme Figura 31.

Figura 31 - Plot Profile



Em seguida, como mostrado na Figura 32, é possível visualizar as barras que a linha está conectada, a sua distância em km (quilômetros), seu fluxo de potência, as tensões e correntes nas fases e as perdas técnicas na linha selecionada.

Figura 32 - Grandezas Elétricas

```
Values for:  LINE.LINHA3
Bus1= b
Bus2= c

Distance from Meter:   2,500 kM (  1,553 mi)
Power Flow:          1307,753 kW + j  620,337 kvar

Phase Currents:        61,170  60,994  61,063 Amps
Phase Voltages(L-N):    7,906   7,896   7,896 kV
Per Unit Voltages:      0,992   0,991   0,991

Losses for this Element:
TotalLosses:   17,341 kW + j  11,166 kvar

Number of Customers: 1
Total Customers downline: 3
```

2.7 Resultados da Simulação do Sistema Equilibrado de Distribuição ao longo de 24 horas (*Mode Daily*).

Se o usuário desejar simular o circuito em um determinado período no tempo, será preciso especificar a curva para cada carga do sistema durante este período, e para executar esta função é utilizado o comando *Loadshape* com seus parâmetros, como mostra a Figura 33.

Figura 33 - *Loadshape*

```
New Loadshape.Curva_de_CargaAA  npts=24  interval=1
~ mult=(0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.2 0.3 0.40 0.70 0.70 0.80 0.80 0.89 0.80 0.90 0.70 0.70 0.70 0.80 0.50 0.4 0.3 0.2 0.2 0.1 )

New Loadshape.Curva_de_CargaBB  npts=24  interval=1
~ mult=(0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.5 0.95 0.95 0.95 0.95 0.30 0.95 0.95 0.95 0.95 0.2 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 )

New Loadshape.Curva_de_CargaCC  npts=24  interval=1
~ mult=( 0.5 0.54 0.52 0.60 0.62 0.65 0.66 0.67 0.70 0.74 0.80 0.81 0.82 0.85 0.85 0.86 0.82 0.81 0.78 0.62 0.60 0.58 0.57 0.53 )


New Load.CARGA1  phases=1 bus1=G  conn=wye  model=8  kV=0.22  kW=10  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA2  phases=3 bus1=B  conn=delta  model=8  kV=13.8  kW=1000  pf=0.92
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
```

Na figura anterior foram declarados três comandos *Loadshape*, cada um com uma curva de carga e nomes diferentes. Cada um possui 24 pontos com intervalos de uma hora, ou seja, totalizando um dia completo.

No comando *mult* são inseridos os fatores de multiplicação, por exemplo, quando determinado fator valer 1 (um), significa que a carga está operando com 100% naquela hora, se valer 0,4, a carga está operando com 40% naquela hora e assim por diante.

Outra forma de configurar uma curva de carga é através de um arquivo externo em formato *.csv, conforme a Figura 34.

Figura 34 - Arquivo Externo .csv

```
New Loadshape.Curva_de_CargaAA  npts=24  interval=1
~ mult=( File = Dados1.csv)
```

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0.1								
2	0.1								
3	0.1								
4	0.1								
5	0.1								
6	0.2								
7	0.3								
8	0.4								
9	0.7								
10	0.7								
11	0.8								
12	0.8								
13	0.89								
14	0.8								
15	0.9								
16	0.7								
17	0.7								
18	0.7								
19	0.8								
20	0.5								
21	0.4								
22	0.3								
23	0.2								
24	0.2								
25									

Lembrando que o arquivo *.csv que contém a curva de carga precisa estar na mesma pasta em que o projeto OpenDSS está sendo executado, caso contrário o *software* indicará *Not Found* (Não Encontrado).

O próximo passo é especificar uma curva de carga para cada carga do sistema e configurar o modo diário de simulação (Figura 35).

Figura 35 - Curva de Carga e Modo Diário de Simulação

```
New Load.CARGA1   phases=1 bus1=B conn=delta model=8  kV=0.22 kW=10 pf=0.90  daily=Curva_de_CargaAA
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA2  phases=3 bus1=B conn=delta model=8 kV=13.8 kW=1000 pf=0.92  daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA3 phases=3 bus1=C conn=delta model=8 kV=13.8 kW=500 pf=0.92  daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA4 phases=3 bus1=E conn=delta model=8 kV=13.8 kW=800 pf=0.92  daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA5 phases=3 bus1=F conn=delta model=8 kV=13.8 kW=20   pf=0.92  daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA6 phases=3 bus1=D conn=delta model=8 kV=13.8 kW=120 pf=0.92  daily=Curva_de_CargaCC
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)

Set voltagebases=[13.8 0.38]
Calcvoltagebases

set mode=daily
set stepsize=1h
set number=24
```

Na figura anterior, cada carga deve apresentar sua curva que corresponde a um período de 24 horas. O comando *set mode, set stepsize* e *set number,* representam o modo diário, intervalos entra as horas e números de pontos definidos no comando *mult,* respectivamente.

Para obter os resultados das grandezas elétricas no tempo, é utilizado o comando *Monitor*. É preciso informar o nome, qual elemento vai ser monitorado, qual terminal o *monitor* vai ser conectado e a grandeza elétrica observada. Para este sistema teste, as tensões, as correntes e as potências elétricas foram observadas através dos elementos:

- Linha1
- Carga1
- Carga2
- Carga6

As linhas de código em linguagem OpenDSS para o comando *Monitor* estão apresentadas na Figura 36.

Figura 36 - *Monitor*

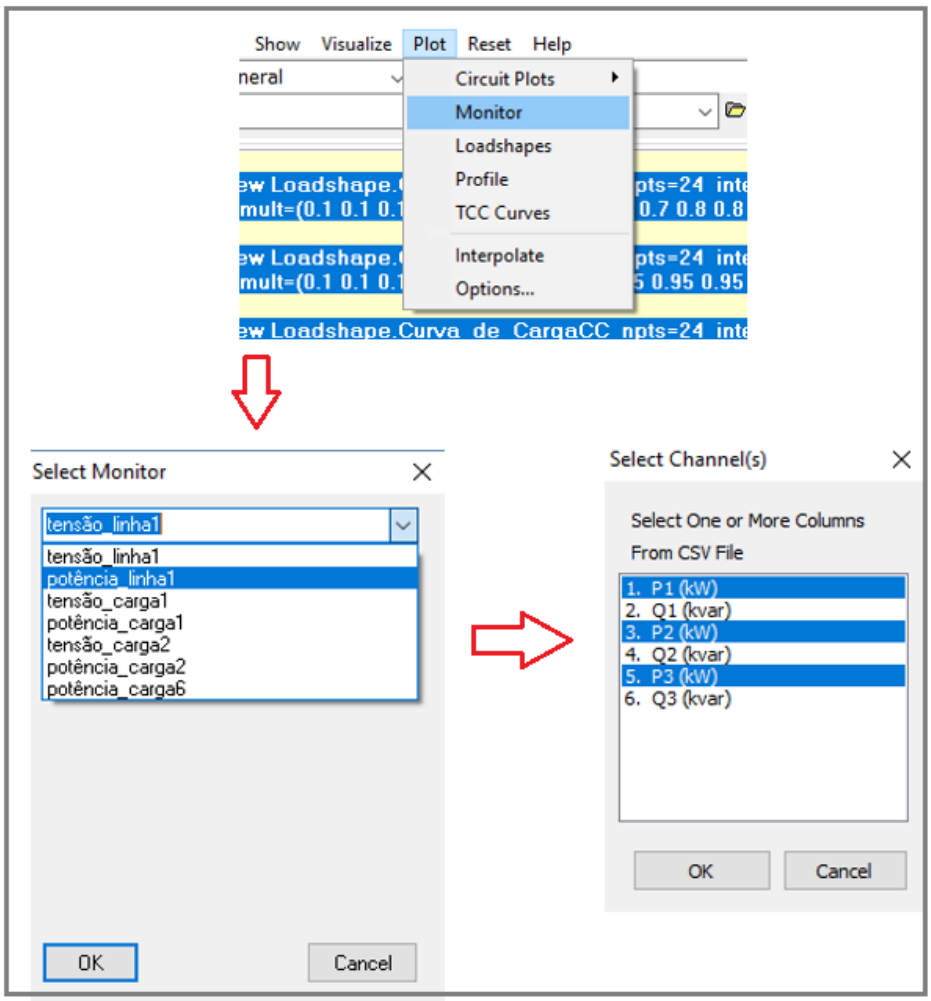
```
Set voltagebases=[13.8 0.38]
Calcvoltagebases

set mode=daily
set stepsize=1h
set number=24

New monitor.Tensão_linha1     element=Line.Linha1    terminal=1  mode=0  ppolar=no
New monitor.Potência_linha1   element=Line.Linha1    terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Tensão_carga1     element=Load.Carga1    terminal=1  mode=0  ppolar=no
New monitor.Potência_carga1   element=Load.Carga1    terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Tensão_carga2     element=Load.Carga2    terminal=1  mode=0  ppolar=no
New monitor.Potência_carga2   element=Load.Carga2    terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Tensão_carga6     element=Load.Carga6    terminal=1  mode=0  ppolar=no
New monitor.Potência_carga6   element=Load.Carga6    terminal=1  mode=1  ppolar=no
```

No código da figura anterior tem-se:

- *Element=Line.Linha1* – Monitor conectado na linha1;
- *Terminal=1* – Monitor conectado ao terminal 1 da linha;
- *Mode=0* – Modo de se obter as tensões e correntes;
- *Mode=1* – Modo de se obter as potências;
- *Ppolar=no* – Significa que os resultados não serão apresentados na forma polar.

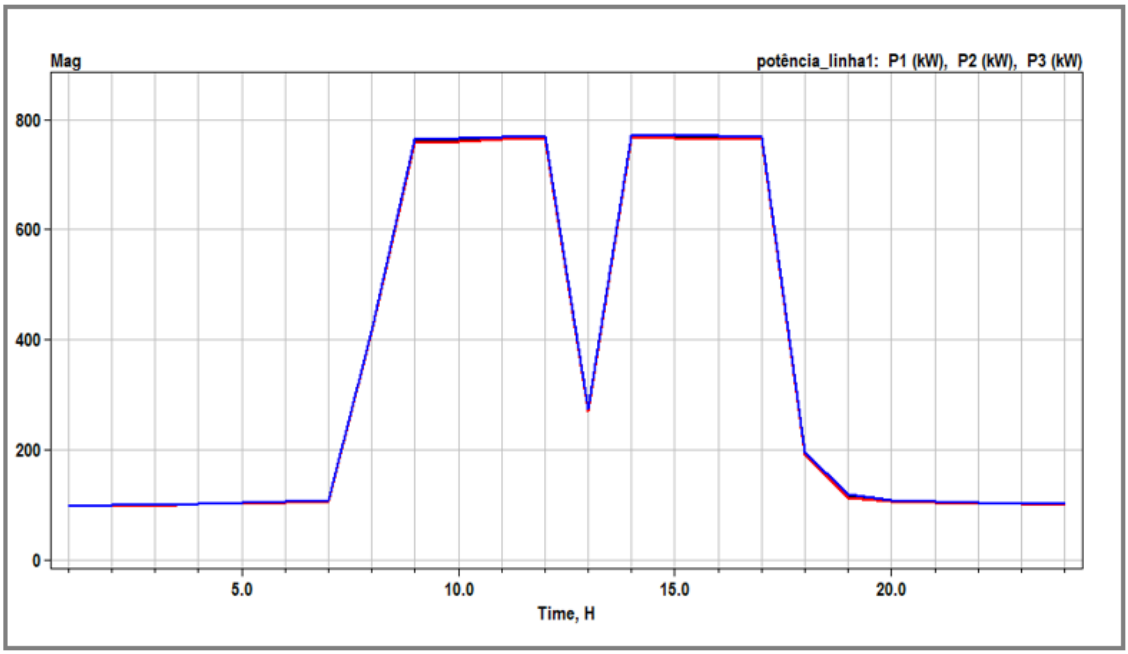
Para visualizar os resultados o usuário deve seguir os passos: Ctrl+A e Ctrl+D → *Plot* → *Monitor*, e escolher a grandeza desejada, por exemplo potência_linha1 → P1, P2, P3, conforme a Figura 37.

Figura 37 - Plot



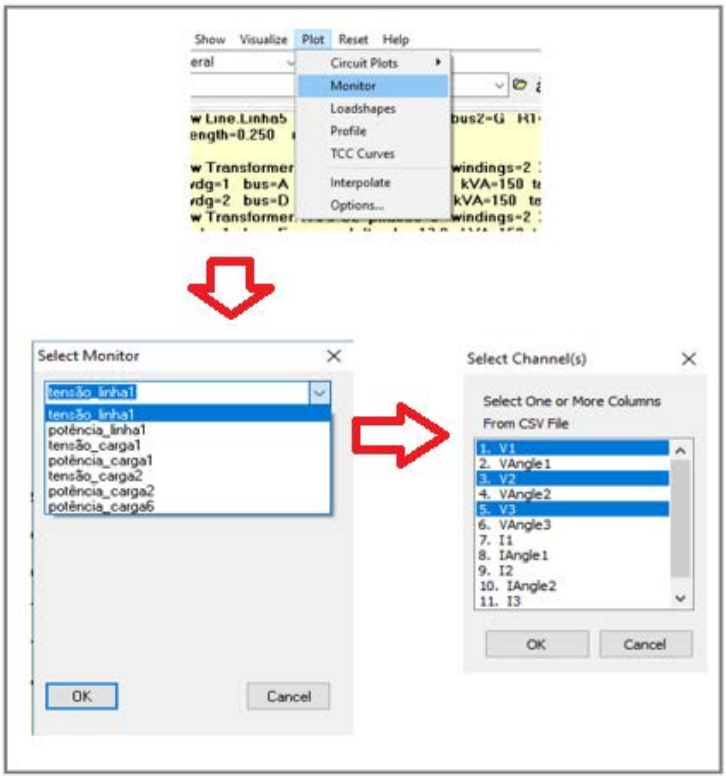
Na Figura 38 pode-se observar as potências ativas trifásicas na linha1 ao longo de 24 horas.

Figura 38 - Potências ativas na Linha1 ao longo de 24 horas



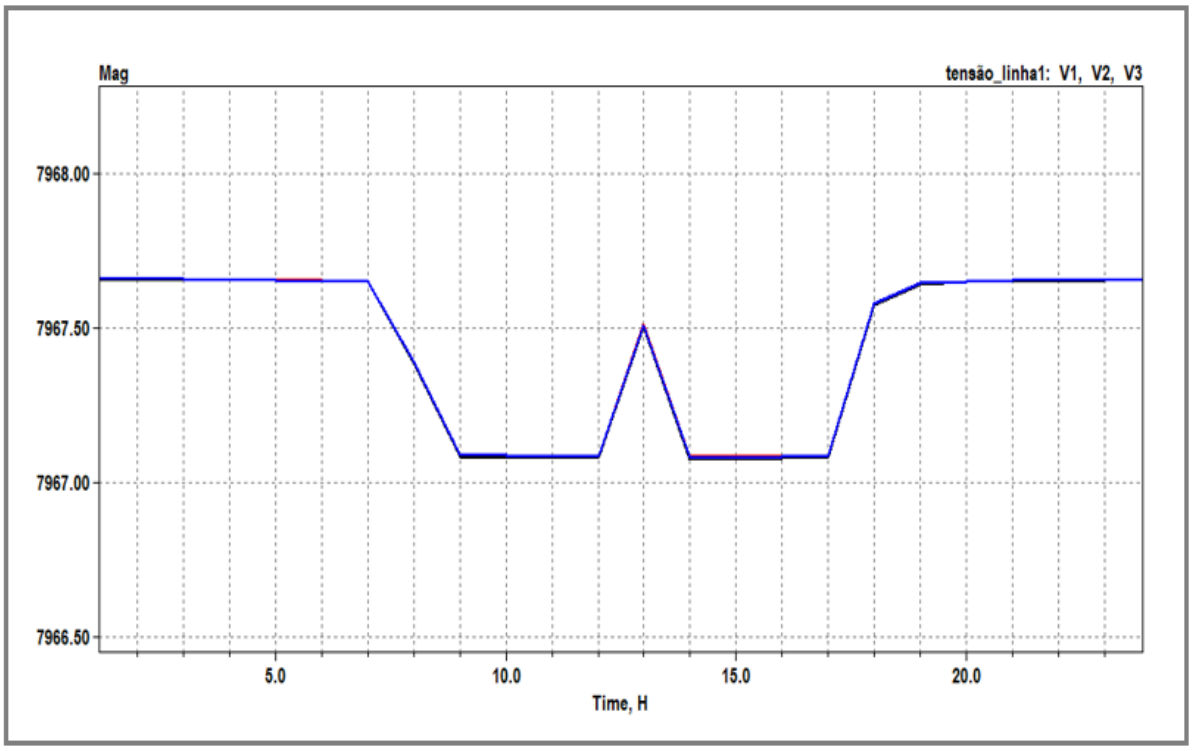
Para visualizar as tensões na linha1 ao longo de 24 horas o passo é o mesmo (Plot → *Monitor* → *Tensão_linha1* → *V1, V2, V3*), conforme Figura 39.

Figura 39 - Plot



Na Figura 40 pode-se observar as tensões na linha1 ao longo de 24 horas.

Figura 40 - Tensões na Linha1 ao longo de 24 horas



Se o usuário desejar visualizar as tensões em pu ao longo do tempo, deve-se seguir os seguintes passos: *Record Commands* → *Plot* → *Monitor* → Tensão_linnha1 → (V1, V2, V3), conforme Figura 41. Logo aparecerão algumas linhas de código que representam a sequência de comandos escritos acima. A função do usuário é configurar as tensões de bases, conforme Figura 42.

Figura 41 – Plot

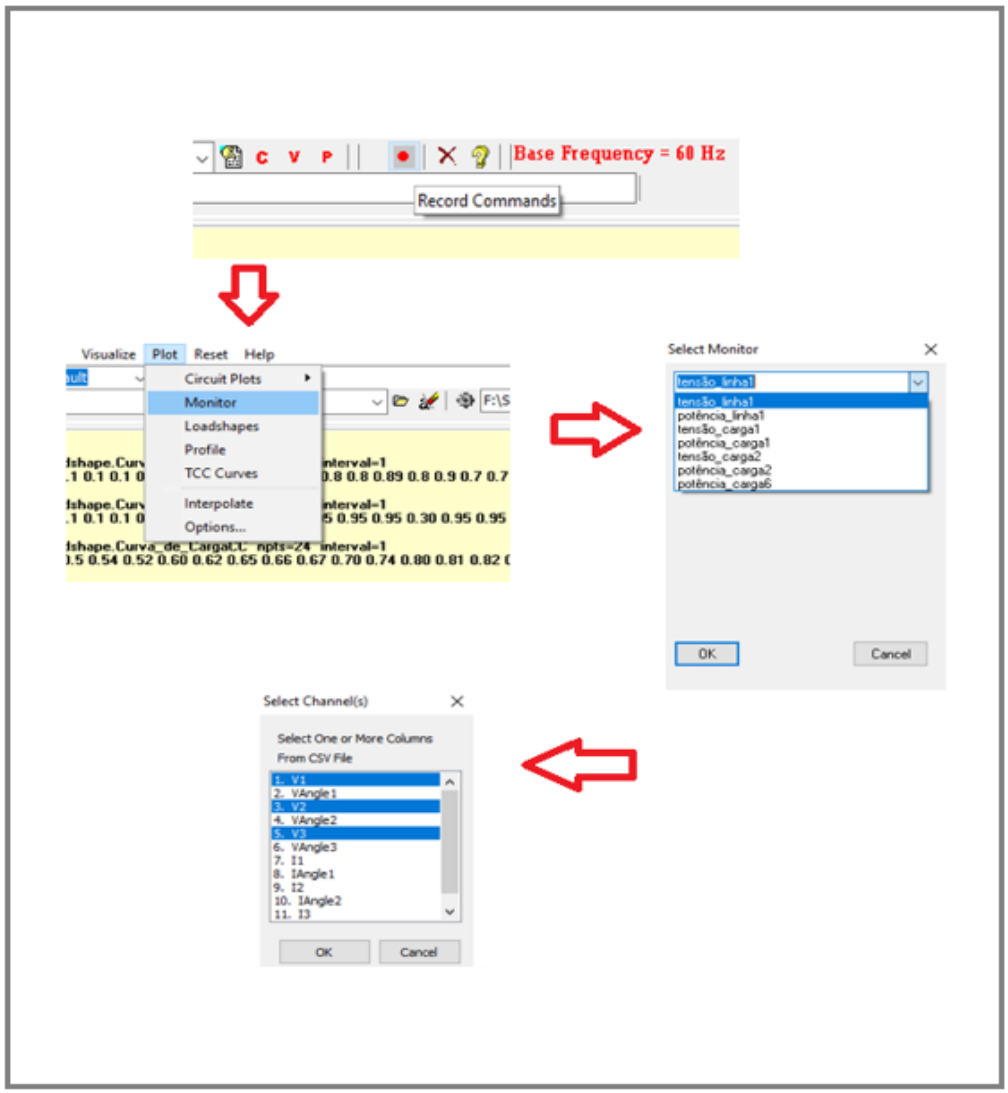
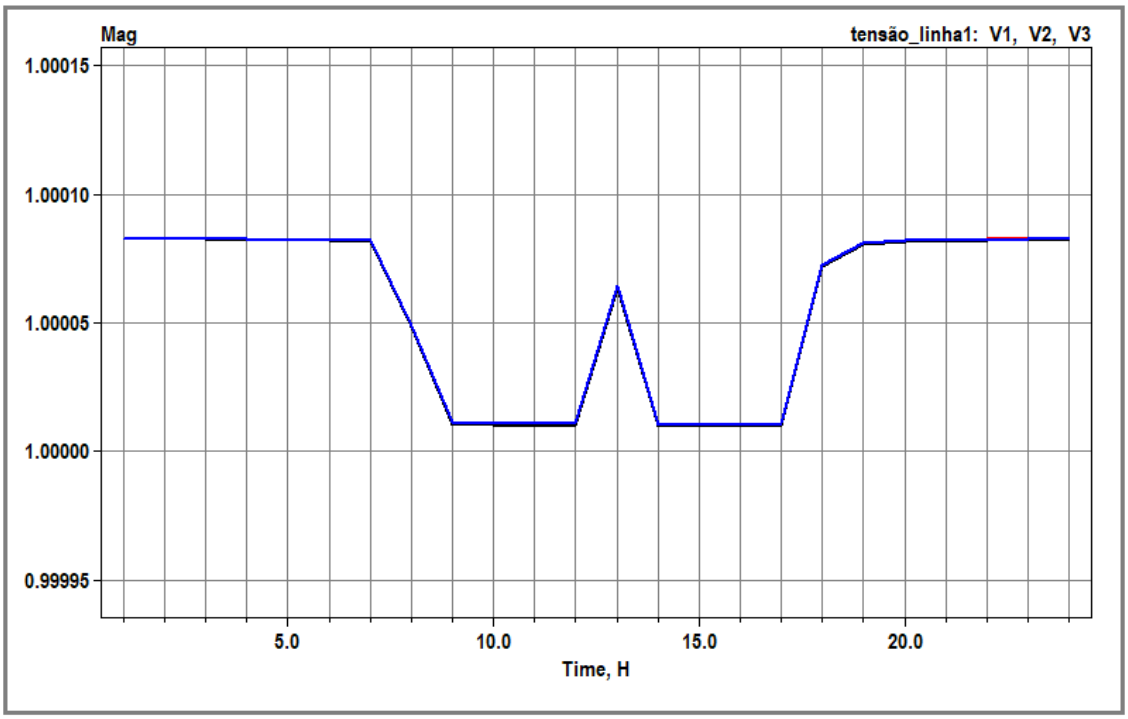


Figura 42 – Configuração das tensões de base

```
Export monitors tensão_linha1
Plot monitor object= tensão_linha1 channels=(1 3 5)   bases = [7967 7967 7967]
```

A configuração é feita com tensão de base em V (Volt) e não kV. Após o usuário seguir todo este processo, é só realizar a simulação (Ctrl+A e Ctrl+D). As tensões em pu podem visualizadas, conforme Figura 43.

Figura 43 - Tensões em pu ao longo de 24 horas



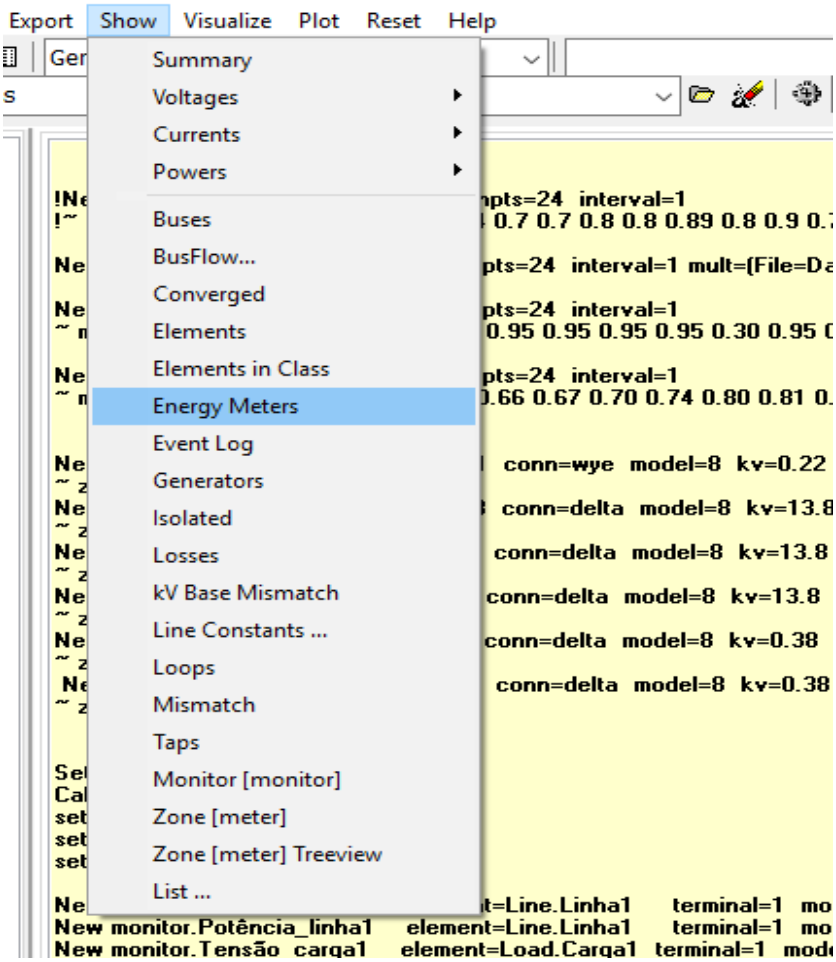
Outro resultado importante que pode ser visualizado pelo usuário são os dados de saída do *Energymeter.* Este comando tem a capacidade de armazenar informação ao longo do tempo (Figura 44).

Figura 44 - *EnergyMeter*

```
New EnergyMeter.Linha1   element=Line.Linha1   terminal=1
```

O usuário deve seguir o passo: Show → *EnergyMeters* (Figura 45).

Figura 45 - *EnergyMeter*



Em seguida os dados de saída do EnergyMeter são apresentados, conforme Figura 46.

Figura 46 - Dados de saída do *EnergyMeter*

```
ENERGY METER VALUES

Registers:
Reg 1 = kWh
Reg 2 = kvarh
Reg 3 = Max kW
Reg 4 = Max kVA
Reg 5 = Zone kWh
Reg 6 = Zone kvarh
Reg 7 = Zone Max kW
Reg 8 = Zone Max kVA
```

Meter	Reg 1	Reg 2	Reg 3	Reg 4	Reg 5	Reg 6	Reg 7	Reg 8
linha1	25205	-6854	2309	2334	24864	11877	2273	2517

3 MODELAGEM DE UM SISTEMA DESEQUILIBRADO SEM A PRESENÇA DE GD NO SOFTWARE OPENDSS

Em um sistema desequilibrado a distribuição das fases ocorre de modo irregular devido a vários fatores como: linhas com disposição física assimétrica e sem transposição, alguns tipos de cargas conectadas no sistema, como utilização de fornos elétricos trifásicos a arco, etc.

Para este circuito teste as impedâncias mútuas das linhas de distribuição serão consideradas como não nulas e a Carga2 ficará sem umas das fases, simulando assim um sistema desequilibrado.

3.1 Linha Desequilibrada

Na Figura 47 são apresentados os parâmetros das linhas de distribuição com a presença das impedâncias mútuas.

Figura 47 - Linhas de Distribuição

```
New Linecode.Arranjo1   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix=[0.18  |  0.03  0.222 | 0.029 0.03  0.222]
~ xmatrix=[0.40 | 0.08  0.402 |  0.07  0.08  0.402]
~ cmatrix=[2.74 | -0.70  2.96 | -0.34  -0.71  2.74]
New Linecode.Arranjo2   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix=[0.45 |  0.05  0.705 | 0.04  0.05  0.705]
~ xmatrix=[0.35 | 0.07  0.450 |  0.06  0.07  0.450]
~ cmatrix=[2.74 | -0.80  2.96 | -0.40  -0.79  2.74]


New Line.Linha1   phases=3   bus1=Subestação   bus2=A   Linecode=Arranjo1
~ length=1.5   units=km

New Line.Linha2   phases=3   bus1=A   bus2=B   Linecode=Arranjo1
~ length=1.0   units=km

New Line.Linha3   phases=3   bus1=B   bus2=C   Linecode=Arranjo2
~ length=2.5    units=km

New Line.Linha4   phases=3   bus1=C   bus2=E   Linecode=Arranjo2
~ length=2.0     units=km

New Line.Linha5   phases=1   bus1=D   bus2=G   R1=0.443   X1=0.428
~ length=0.250   units=km
```

Supõe-se que a Carga 2 perdeu uma das fases, conforme Figura 46.

Figura 48 - Parâmetro da Carga2

```
New Load.CARGA2 phases=2 bus1=B conn=delta model=8 kV=13.8 kW=1000 pf=0.92  daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv= (0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
```

3.2 Resultados da Simulação do Sistema Desequilibrado de Distribuição ao longo de 24 horas (*Mode Daily*).

Nesta seção são mostrados apenas os resultados da simulação do sistema desequilibrado, sendo desconsiderado o passo a passo da visualização pois já foi visto nas seções anteriores.

3.2.1 Tensão na Linha1

Nas Figuras 49 e 50 são apresentadas as tensões desequilibradas nas fases da Linha1 em valores reais e pu, respectivamente.

Figura 49- Tensão (real) na Linha1

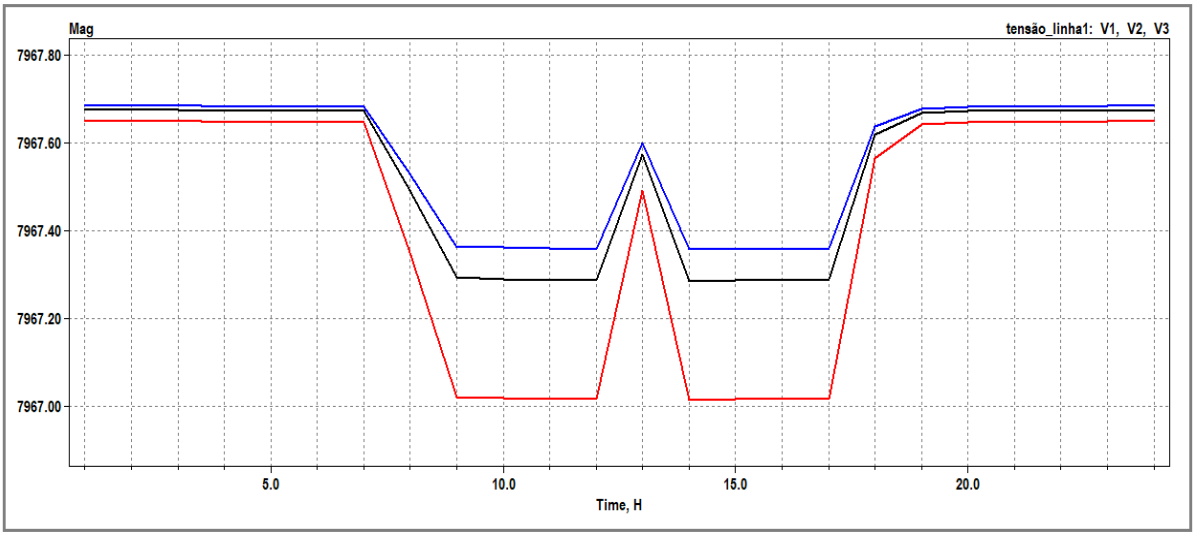
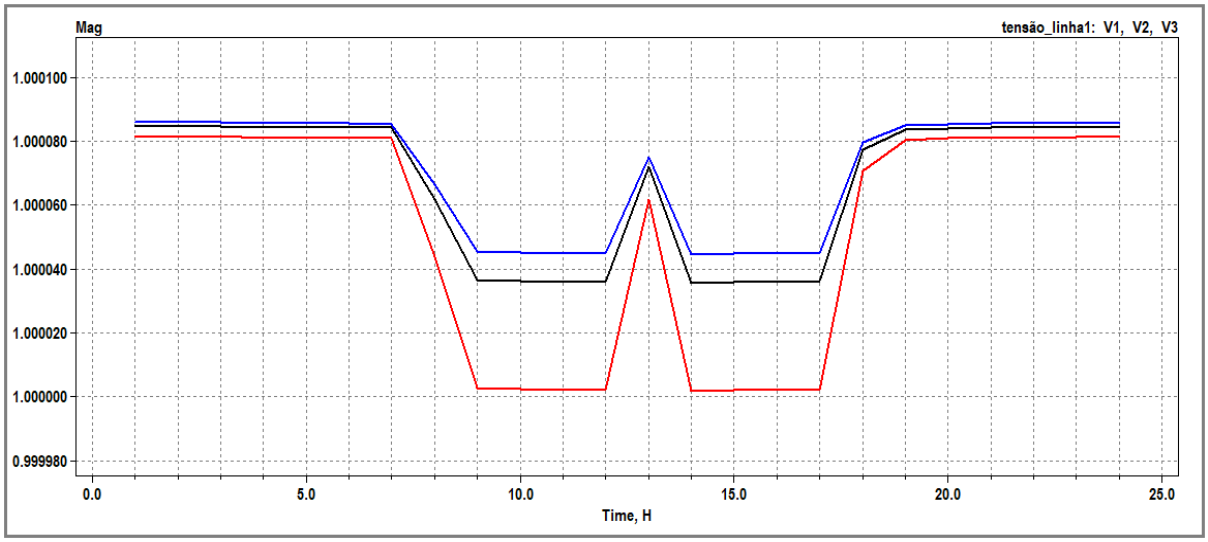


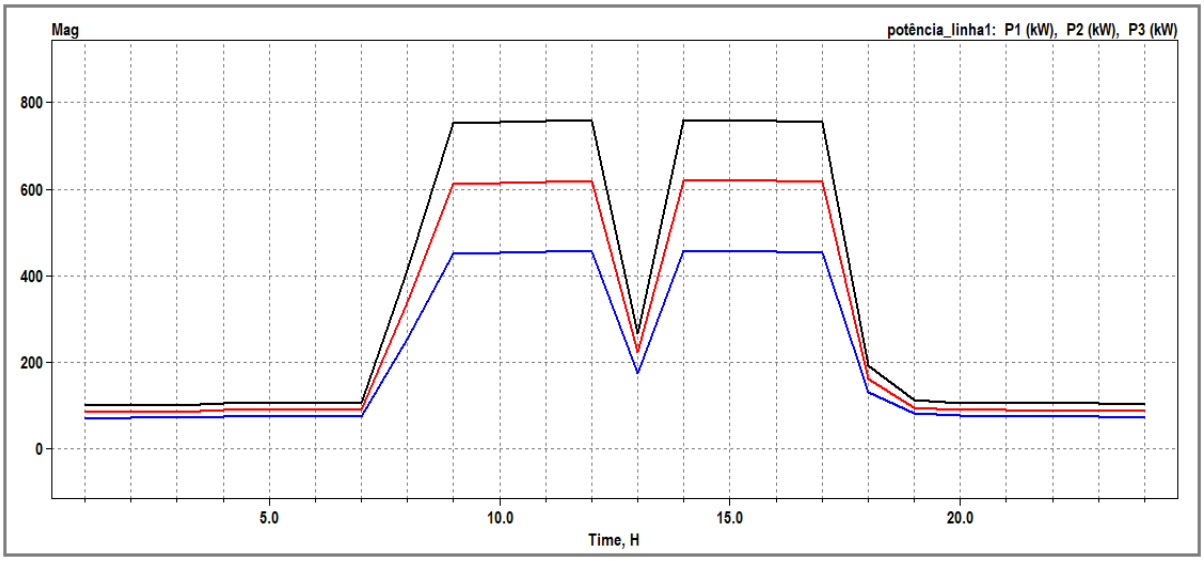
Figura 50 – Tensão (pu) na Linha1



3.2.2 Potência na Linha1

Na Figura 51 são apresentadas as potências desequilibradas nas fases da Linha1.

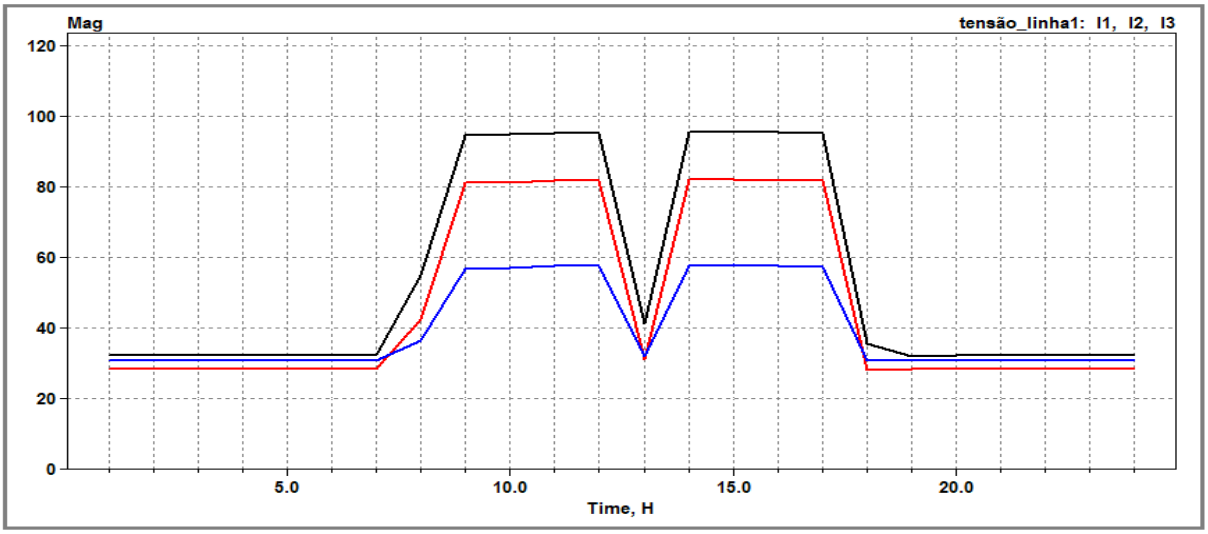
Figura 51 - Potências na Linha1



3.2.3 Correntes na Linha1

Na Figura 52 são apresentadas as correntes desequilibradas nas fases da Linha1.

Figura 52 - Correntes na Linha1



3.2.4 EnergyMeter

Na Figura 53 são apresentados os dados de saída do *EnergyMeter*.

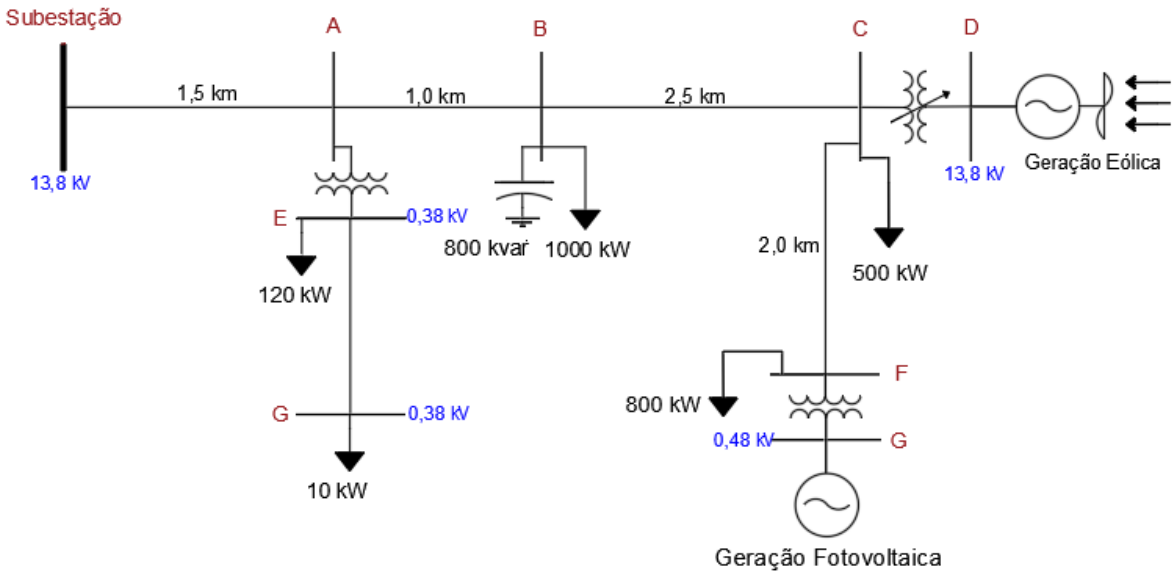
Figura 53 - Dados de saída do *EnergyMeter*

```
ENERGY METER VALUES

Registers:
Reg 1 = kWh
Reg 2 = kvarh
Reg 3 = Max kW
Reg 4 = Max kVA
Reg 5 = Zone kWh
Reg 6 = Zone kvarh
Reg 7 = Zone Max kW
Reg 8 = Zone Max kVA
Reg 9 = Overload kWh Normal
Reg 10 = Overload kWh Emerg
Reg 11 = Load EEN
Reg 12 = Load UE
Reg 13 = Zone Losses kWh
Reg 14 = Zone Losses kvarh
Reg 15 = Zone Max kW Losses
Reg 16 = Zone Max kvar Losses
Reg 17 = Load Losses kWh
Reg 18 = Load Losses kvarh
Reg 19 = No Load Losses kWh
Reg 20 = No Load Losses kvarh

Meter            Reg 1      Reg 2      Reg 3      Reg 4      Reg 5

linha1            20163      -9400       1837       1840      19892
```

4 MODELAGEM DE UM SISTEMA EQUILIBRADO COM A PRESENÇA DE GD NO SOFTWARE OPENDSS

A Figura 54 mostra o diagrama unifilar de um sistema hipotético de distribuição com 7 barras com a presença de Geração Distribuída (GD).

Figura 54 – Diagrama unifilar de um sistema com a presença de GD



Na barra F e C do sistema teste foram inseridas uma Geração Fotovoltaica e uma Geração Eólica, respectivamente.

4.1 Modelagem do Gerador Fotovoltaico no OpenDSS

Para modelar um gerador fotovoltaico no OpenDSS é preciso configurar alguns parâmetros como: Curva que relaciona a potência do painel com sua temperatura, a eficiência do inversor, a curva de irradiação e temperatura durante o dia, criação do elemento gerador e o transformador que faz a conexão ao sistema.

4.1.1 Curva da Potência versus Temperatura

Na Figura 55 é apresentado o código da curva de potência relacionado com a temperatura.

Figura 55 - Curva da Potência versus Temperatura

```
New XYCurve.Pot_Temp  npts=4  xarray=[0  25  75  100]  yarray=[1.2  1  0.8  0.6]
```

Na figura acima tem-se:

- *XYCurve* – Cria-se uma curva de dois eixos (x e y);
- *Npts* – Número de pontos do eixo x e y.
- *Xarray* – 4 valores de temperatura
- *Yarray* – 4 valores de potências em percentual.

O parâmetro *Xarray* está relacionado com *Yarray*, ou seja, se por exemplo a temperatura da placa em dado instante está em 0 graus a placa fotovoltaica irá fornecer 120% de sua potência nominal, se em outro instante a temperatura da placa for 75 graus ela irá fornecer 80% de potência nominal, e assim por diante.

4.1.2 Curva de Eficiência do Inversor

Na Figura 56 é apresentado o código da curva de eficiência do inversor.

Figura 56 - Eficiência do Inversor

```
New XYCurve.Eficiência  npts=4  xarray=[0.1  0.2  0.4  1]  yarray=[0.86  0.90  0.93  0.97]
```

Na figura anterior, quando estiver passando uma potência de 0,1 pu na saída do inversor o mesmo apresenta uma eficiência de 86%, se o inversor estiver operando com 100% de sua potência, a eficiência do mesmo estará em 97%.

4.1.3 Curva de Irradiação

A Figura 57 apresenta o código da curva de irradiação ao longo do dia.

Figura 57 - Curva de Irradiação

```
New Loadshape.Irradiação   npts=24   interval=1
~ mult=[0  0  0  0  0  0  0.1  0.2  0.3  0.4  0.5  0.8  1  1  1  0.9  0.7  0.1  0  0  0  0  0  0]
```

Na figura acima pode ser observada a distribuição ao longo de 24 pontos com intervalos de uma hora. Esta distribuição é feita por meio de fatores multiplicadores que variam de 0 a 1; quanto mais próximo de 1 a irradiação é máxima.

4.1.4 Temperatura do Painel

Na Figura 58 é apresentado o código da curva da temperatura do painel ao longo do dia.

Figura 58 - Temperatura do Painel

```
New Loadshape.Temp_Painel   npts=24   interval=1
~ temp= [25 25  25  25  25 25 25 30 40  50  60  60  70  65  50 50  40  25  25  25 25 25 25 25]
```

4.1.5 Criação dos Elementos *PVSystem* e *Transformer*

Após o usuário criar todas a curvas necessárias para a parametrização do Painel Fotovoltaico no OpenDSS, é preciso criar o próprio gerador e o transformador de conexão ao sistema.

Na Figura 59 é apresentado o código do elemento *PVSystem.*

Figura 59 - *PVSystem*

```
New PVSystem.Geração_Fotovoltaica  phases=3  bus1=F kv=0.38 irrad=0.98 pmpp=250
~ temperature=25  pf=1  %cutin=0.1 %cutout=0.1 effcurve=Eficiência  P-TCurve=Pot_Temp
~ Daily=Irradiação TDaily=Temp_Painel
```

Na figura acima tem-se:

- *PVSystem* – Cria no sistema um gerador fotovoltaico;
- *Bus1* – Conectado a barra F;
- *Irrad* – Irradiação de base (dado do fabricante da placa);
- *Pmpp* – Potência nominal do gerador;
- *Temperature* – Temperatura base;
- *Pf* – Fator de potência unitário;
- *%cutin=0.1* – Se a potência for maior que 10% de sua potência nominal o gerador inicia a operação;
- *%cutout=0.1* – Se a potência for menor que 10% de sua potência nominal o gerador é desligado;
- *Effcurve* – Curva de eficiência já definida;
- *P-TCurve* – Curva de potência versus temperatura já definida;
- *Daily* – Curva de Irradiação já definida;
- *TDaily* – Curva de temperatura do painel já definida.

Na Figura 60 é apresentado o código do elemento *Transformer.*

Figura 60 - Elemento *Transformer*

```
New Transformer.PV  phases=3   Xhl=2   %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5

~ wdg=1  bus=F  conn=wye  kv=0.38  kVA=250  tap=1
~ wdg=2  bus=E  conn=delta  kv=13.8  kVA=250  tap=1
```

O gerador fotovoltaico é conectado ao sistema através de um transformador elevador de tensão, a barra F está conectada ao gerador e a barra E conectada ao sistema. O transformador TRAFO2 será substituído pelo transformador PV, ou seja, o código do TRAFO2 será apagado.

Na Figura 61 pode-se observar o código completo de parametrização do gerador fotovoltaico no OpenDSS.

Figura 61 - Código do Gerador Fotovoltaico

```
New XYcurve.Pot_Temp npts=4 xarray=[0 25 75 100] yarray=[1.2 1 0.8 0.6]

New XYcurve.Eficiência npts=4 xarray=[0.1 0.2 0.4 1] yarray=[0.86 0.9 0.93 0.97]

New Loadshape.Irradiação npts=24 interval=1
~  mult=[0 0 0 0 0 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 1 1 1 0.9 0.7 0.1 0 0 0 0 0 0 ]

New Tshape.Temp_Painel npts=24   interval=1
~  temp=[25 25 25 25 25 25 25 30 40 50 60 60 70 70 65 50 50 40 25 25 25 25 25 25]

New PVSystem.PV  phases=3  bus1=F  kv=0.38  irrad=0.98  pmpp=250  temperature=25 pf=1
~  %cutin=0.1 %cutout=0.1 Effcurve=Eficiência  P-TCurve=Pot_Temp  Daily=Irradiação  TDaily=Temp_Painel


New Transformer.PV  phases=3    Xhl=2   %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
~  wdg=1   bus=F   conn=wye   kv=0.38   kVA=250  tap=1
~  wdg=2   bus=E   conn=delta  kv=13.8   kVA=250  tap=1
```

4.2 Modelagem do Gerador Eólico no OpenDSS

Para modelar um gerador eólico no OpenDSS é preciso configurar a curva de potência do gerador e o transformador de ligação ao sistema de distribuição. Para este circuito teste foi inserido um regulador de tensão para conexão ao sistema. O gerador usado no circuito teste é do tipo gaiola esquilo.

4.2.1 Curva de Potência do Gerador Eólico

Na Figura 62 é apresentado o código da curva de potência do gerador eólico em um período de 24 horas.

Figura 62 – Código da curva de potência do gerador eólico

```
New LoadShape.3 npts=24    interval=1    %mult=(File=LoadShape3.csv)
```

Na Figura 63 são apresentados os dados da curva de potência do gerador eólico em forma de arquivo *.csv. É necessário que o arquivo LoadShape3.csv esteja na mesma pasta em que o projeto principal esteja sendo executado.

Figura 63 - LoadShape3.csv

	A	B	C
1	0.934010152		
2	0.852791878		
3	0.852791878		
4	0.791878172		
5	0.812182742		
6	0.812182742		
7	0.812182742		
8	0.852791878		
9	0.934010152		
10	0.913705584		
11	0.994923858		
12	1.035.532.994		
13	10.964.467		
14	1.076.142.132		
15	10.964.467		
16	10.964.467		
17	1.157.360.406		
18	123.857.868		
19	123.857.868		
20	123.857.868		
21	1.218.274.112		
22	111.675.127		

4.2.2 Regulador de tensão para conexão ao sistema de distribuição

Na Figura 64 é apresentado o código do regulador de tensão para conexão ao sistema.

Figura 64 - Regulador de tensão

```
New Transformer.wind  phases=3 xhl=5.75
~ wdg=1 bus=H  kV=13.8 kVA=750 conn=wye   tap=1
~ wdg=2 bus=C  kV=13.8 kVA=750 conn=wye   tap=1

New Regcontrol.Reg_Eólico  Transformer=wind  winding=2 vreg=122
band=3
```

Na figura anterior o elemento *Regcontrol* tem como função controlar e monitorar a tensão do transformador ao qual está associado. O controle é feito através do *Tap* do transformador.

4.2.3 Código do Gerador Eólico

Na Figura 65 é apresentado o código do elemento gerador do tipo gaiola esquilo.

Figura 65 - New *Generator*

```
New Generator.Eólico bus1=H kv=13.8 kw=100  pf=0.92 daily=3 model=6
~ usermode=indmach012a userdata=(Rs=0.00046, Xs=0.1202, Rr=0.10993, Xr=0.18084, Xm=6.84)
```

Na figura anterior tem-se:

- *Daily* – Curva de potência já definida;
- *Usermode=indmach012* – Gerador de indução e gaiola esquilo;
- *Userdata* – Características elétricas do gerador.

4.2.4 Código completo do circuito teste com a presença de GD

Nas Figuras 66 e 67 é apresentado um esquema geral do código e o mesmo de forma integral respectivamente.

Figura 66 - Esquema geral do código com a presença de GD

Clear

1 – Subestação
2 – *Linecode*
3 – Linhas
4 – Transformadores
5 – Banco de Capacitores
6 – Curva de Carga (*LoadShape*)
7 – Cargas
8 – Gerador Fotovoltaico
9 – Gerador Eólico
10 – Configuração dos valores base do sistema e modo Daily
11 – Monitores
12 – *EnergyMeter*
13 – Solve
14 – *Show*
15 – *Plot*

Figura 67 - Código completo do circuito com a presença de GD

```
Clear

New Circuit.Subestação   phases=3   bus=subestação   basekv=13.8
~ mvasc3=20000   mvasc1=21000

New Linecode.Arranjo1   nphases=3   baseFreq=60   R1=0.222   X1=0.402   R0=0.18   X0=0.40
~ units=km   normamps=195
New Linecode.Arranjo2   nphases=3   baseFreq=60   R1=0.705   X1=0.450   R0=0.45   X0=0.35
~ units=km   normamps=195



New Linecode.Arranjo1   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix=[0.18 | 0  0.222 | 0  0  0.222]
~ xmatrix=[0.40 | 0  0.402 | 0  0  0.402]
~ cmatrix=[2.74 | 0  2.96 | 0  0  2.74]
New Linecode.Arranjo2   nphases=3 baseFre=60
~ rmatrix=[0.45 | 0  0.705 | 0  0  0.705]
~ xmatrix=[0.35 | 0  0.450 | 0  0  0.450]
~ cmatrix=[2.74 | 0  2.96 | 0 0  2.74]



New Line.Linha1   phases=3   bus1=Subestação   bus2=A   Linecode=Arranjo1
~ length=1.5   units=km
New Line.Linha2   phases=3   bus1=A   bus2=B   Linecode=Arranjo1
~ length=1.0   units=km
New Line.Linha3   phases=3   bus1=B   bus2=C   Linecode=Arranjo2
~ length=2.5   units=km
New Line.Linha4   phases=3   bus1=C   bus2=E   Linecode=Arranjo2
~ length=2.0   units=km
New Line.Linha5   phases=1   bus1=D   bus2=G   R1=0.443   X1=0.428
~ length=0.250   units=km
```

```
New Transformer.TRAFO1  phases=3   windings=2  Xhl=2   %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
~ wdg=1   bus=A   conn=delta   kv=13.8   kVA=150  tap=1
~ wdg=2   bus=D   conn=wye   kv=0.38   kVA=150   tap=1
!New Transformer.TRAFO2  phases=3   windings=2  Xhl=2   %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
!~ wdg=1   bus=E   conn=delta   kv=13.8   kVA=150  tap=1
!~ wdg=2   bus=F   conn=wye   kv=0.38   kVA=150   tap=1

New Capacitor.BANCO_CAPACITORES  phases=3   bus1=B  kvar=80  kv=13.8


New Loadshape.Curva_de_CargaAA  npts=24  interval=1
~ mult=(0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.2 0.3 0.4 0.7 0.7 0.8 0.8 0.89 0.8 0.9 0.7 0.7 0.7 0.8 0.5 0.4 0.3 0.2 0.2 0.1 )

!New Loadshape.Curva_de_CargaAA  npts=24  interval=1 mult=(File=Dados.csv)

New Loadshape.Curva_de_CargaBB  npts=24  interval=1
~ mult=(0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.5 0.95 0.95 0.95 0.95 0.30 0.95 0.95 0.95 0.95 0.2 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 )

New Loadshape.Curva_de_CargaCC  npts=24  interval=1
~ mult=( 0.5 0.54 0.52 0.60 0.62 0.65 0.66 0.67 0.70 0.74 0.80 0.81 0.82 0.85 0.85 0.86 0.82 0.81 0.78 0.62 0.60 0.58 0.57 0.53 0.52 )


New Load.CARGA1   bus1=G phases=1  conn=wye  model=8  kv=0.22  kW=10   pf=0.9       daily=Curva_de_CargaAA
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.90)
New Load.CARGA2   bus1=B phases=3  conn=delta  model=8  kv=13.8  kW=1000   pf=0.9  daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5, 0, 0.5, 1, 0, 0, 0.90)
New Load.CARGA3  bus1=C phases=3  conn=delta  model=8  kv=13.8  kW=500 pf=0.9      daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.9)
New Load.CARGA4 bus1=E phases=3  conn=delta  model=8  kv=13.8  kW=800 pf=0.9      daily=Curva_de_CargaBB
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.9)
New Load.CARGA5 bus1=F phases=3  conn=delta  model=8  kv=0.38  Kw=20  pf=0.9       daily=Curva_de_CargaAA
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.9)
 New Load.CARGA6 bus1=D phases=3  conn=delta  model=8  kv=0.38  Kw=120  pf=0.90   daily=Curva_de_CargaCC
~ zipv=(0.5,0,0.5,1,0,0,0.90)

New XYcurve.Pot_Temp npts=4 xarray=[0 25 75 100] yarray=[1.2 1 0.8 0.6]

New XYcurve.Eficiência npts=4 xarray=[0.1 0.2 0.4 1] yarray=[0.86 0.9 0.93 0.97]

New Loadshape.Irradiação npts=24 interval=1
~   mult=[0 0 0 0 0 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 1 1 1 0.9 0.7 0.1 0 0 0 0 0 0 ]

New Tshape.Temp_Painel npts=24   interval=1
~   temp=[25 25 25 25 25 25 25 30 40 50 60 60 70 70 65 50 50 40 25 25 25 25 25 25]

New PVSystem.PV  phases=3  bus1=F  kv=0.38  irrad=0.98  pmpp=50  temperature=25 pf=1
~   %cutin=0.1 %cutout=0.1 Effcurve=Eficiência  P-TCurve=Pot_Temp  Daily=Irradiação  TDaily=Temp_Painel

New Transformer.PV  phases=3   Xhl=2   %loadloss=0.5  %noloadloss=0.2 %imag=0.5
~   wdg=1   bus=F   conn=wye   kv=0.38   kVA=250  tap=1
~   wdg=2   bus=E   conn=delta  kv=13.8   kVA=250  tap=1

New LoadShape.3 npts=24 interval=1 mult=(File=LoadShape3.csv)

new generator.Eólico bus1=H kv=13.8 kw=100  pf=0.92 daily=3 model=6
~ usermode=indmach012a userdata=(Rs=0.00046, Xs=0.1202, Rr=0.10993, Xr=0.18084, Xm=6.84)


New Transformer.wind  phases=3 xhl=5.750000
~ wdg=1 bus=H  kV=13.8 kVA=750 conn=wye  tap=1
~ wdg=2 bus=C  kV=13.8 kVA=750 conn=wye  tap=1

New Regcontrol.Reg_Eólico  Transformer=wind winding=2 vreg=122 band=3
~ ptratio=60 delay=15
```

```
Set voltagebases=[13.8  0.38]
Calcvoltagebases
set mode=daily
set stepsize=1h
set number=24

New monitor.Tensão_linha1      element=Line.Linha1     terminal=1  mode=0   ppolar=no
New monitor.Potência_linha1    element=Line.Linha1     terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Tensão_carga1    element=Load.Carga1  terminal=1  mode=0  ppolar=no
New monitor.Potência_carga1  element=Load.Carga1  terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Tensão_carga2    element=Load.Carga2  terminal=1  mode=0  ppolar=no
New monitor.Potência_carga2  element=Load.Carga2  terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Potência_carga6  element=Load.Carga6  terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Potência_Eólico    element=Generator.Eólico   terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Potência_Solar    element=PVSystem.PV   terminal=1  mode=1  ppolar=no


New EnergyMeter.Linha1   element=Line.Linha1  terminal=1
solve

!Show Currents Elements
!Show Voltage LN Nodes
!Show Powers kva Elements
!plot profile

!Export monitors tensão_linha1
!Plot monitor object= tensão_linha1 channels=(1 3 5 ) bases = [7967 7967 7967]
!Export monitors potência_linha1
!Plot monitor object= potência_linha1 channels=(1 3 5 )


!Export monitors tensão_carga2
!Plot monitor object= tensão_carga2 channels=(1 3 5 ) bases = [7967 7967 7967]

!Export monitors tensão_carga1
!Plot monitor object= tensão_carga1 channels=(1 )  bases = [220 220 220]
```

4.3 Resultados da Simulação do Sistema Equilibrado de Distribuição ao longo de 24 horas (*Mode Daily*) com a presença de GD

Para o usuário visualizar as grandezas elétricas presentes nos geradores é preciso definir os monitores, conforme Figura 68.

Figura 68 - *New Monitor*

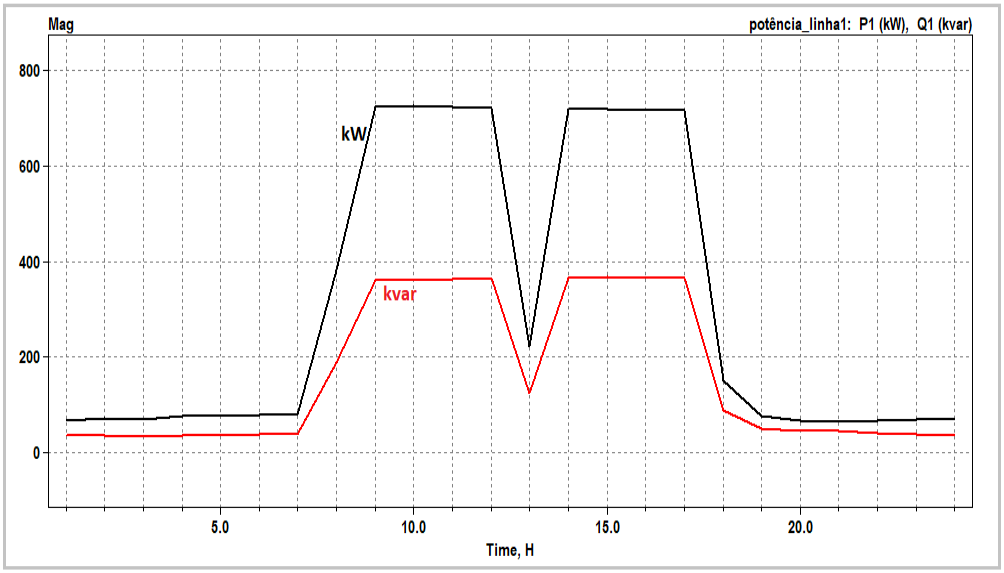
```
New monitor.Potência_Eólico   element=Generator.Eólico  terminal=1  mode=1  ppolar=no
New monitor.Potência_Solar    element=PVSystem.PV       terminal=1  mode=1  ppolar=no
```

O passo a passo para realizar a simulação e visualização das grandezas elétricas pode ser revisto na seção 2.7 deste tutorial.

4.3.1 Potência, tensão e os dados de saída do *EnergyMeter* da Subestação ao longo de 24 horas

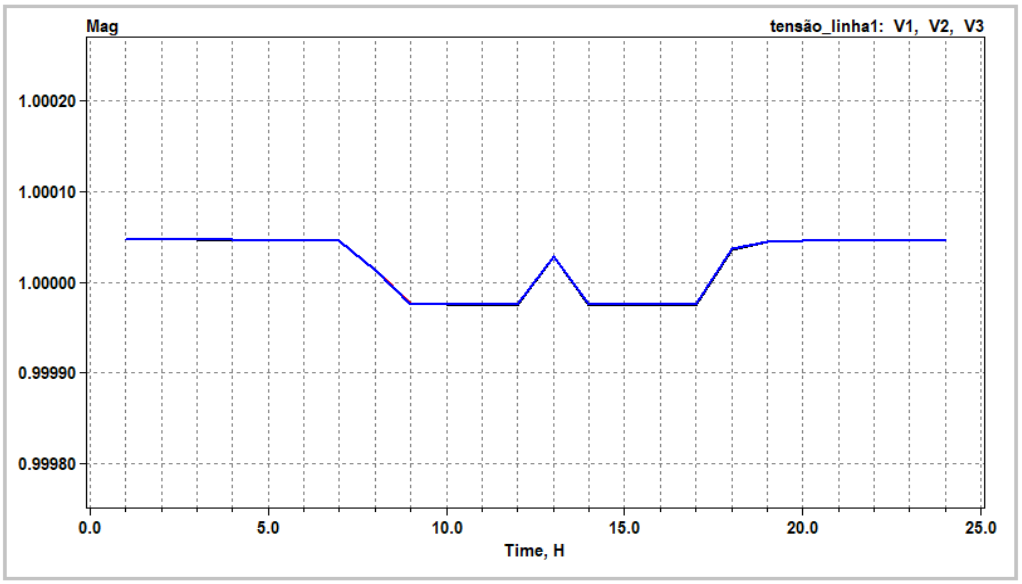
A Figura 69 apresenta a potência ativa e reativa fornecida pela subestação durante este período.

Figura 69 - Potência fornecida pela subestação



A Figura 70 apresenta a tensão no barramento da subestação.

Figura 70 – Tensão no barramento da Subestação



A Figura 71 apresenta os dados de saída do *EnergyMeter* da Linha1.

Figura 71 – Dados de saída do *EnergyMeter*

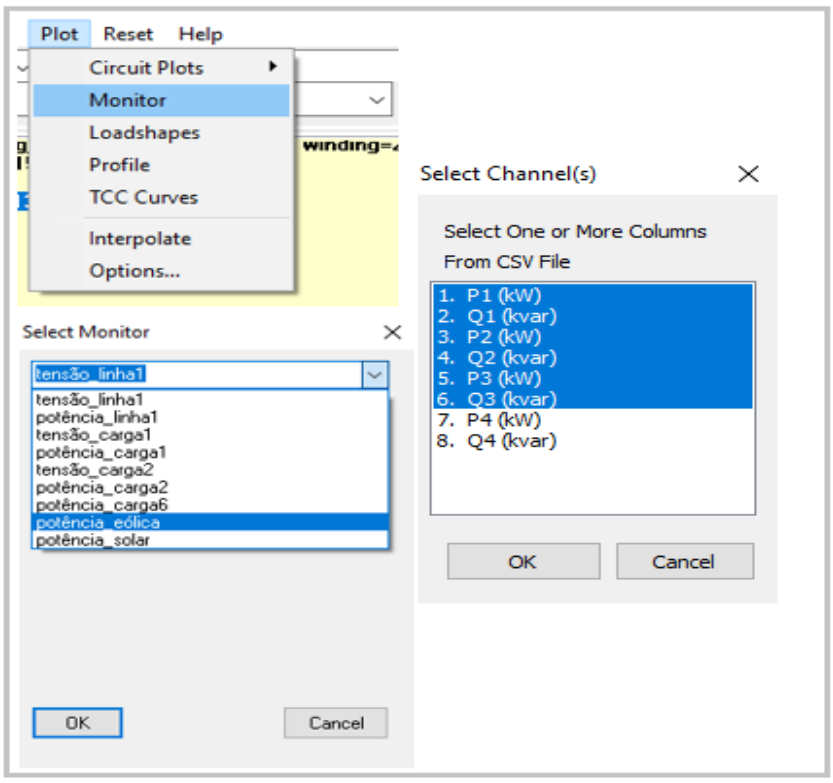
```
ENERGY METER VALUES

Registers:
Reg 1 = kWh
Reg 2 = kvarh
Reg 3 = Max kW
Reg 4 = Max kVA
Reg 5 = Zone kWh
Reg 6 = Zone kvarh
Reg 7 = Zone Max kW
Reg 8 = Zone Max kVA
Reg 9 = Overload kWh Normal
Reg 10 = Overload kWh Emerg
Reg 11 = Load EEN
Reg 12 = Load UE
Reg 13 = Zone Losses kWh
Reg 14 = Zone Losses kvarh
Reg 15 = Zone Max kW Losses
Reg 16 = Zone Max kvar Losses
```

Meter	Reg 1	Reg 2	Reg 3	Reg 4	Reg 5	Reg 6	Reg 7
linha1	22343	11323	2177	2429	24679	11751	2266

4.3.2 Potência e os dados de saída do *EnergyMeter* do Gerador Eólico ao longo de 24 horas

Para visualizar o resultado das grandezas elétricas do gerador eólico o usuário deve seguir os seguintes passos: *Plot* → *Monitor* → potência eólica → P1, P2, P3, O1, Q2, Q3, conforme Figura 72.

Figura 72 – Função *Plot*



Nas Figuras 73 e 74 são apresentadas as potências ativas e reativa no gerador eólico durante o período proposto.

Figura 73 – Potência ativa

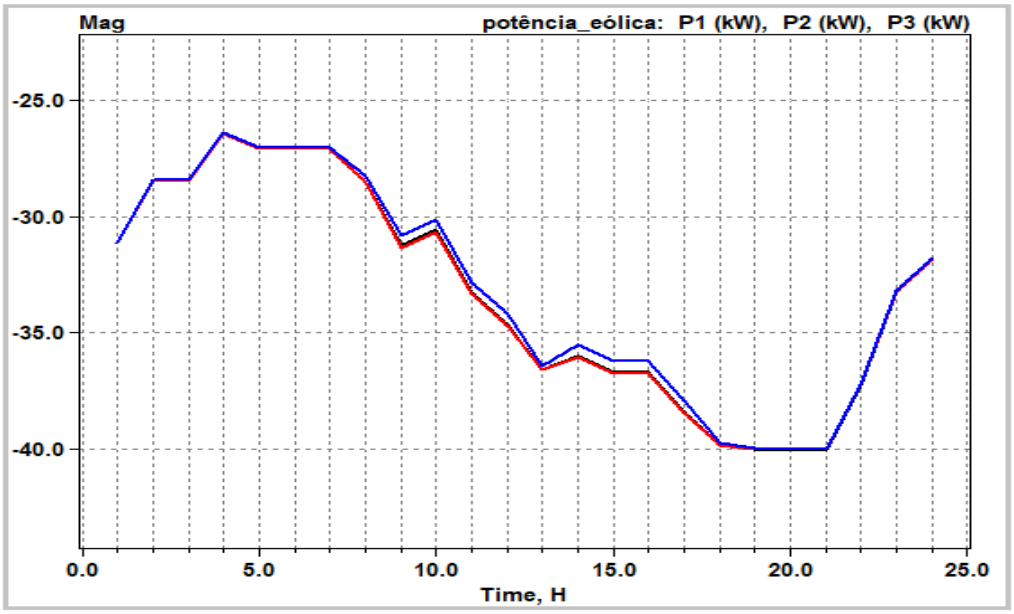
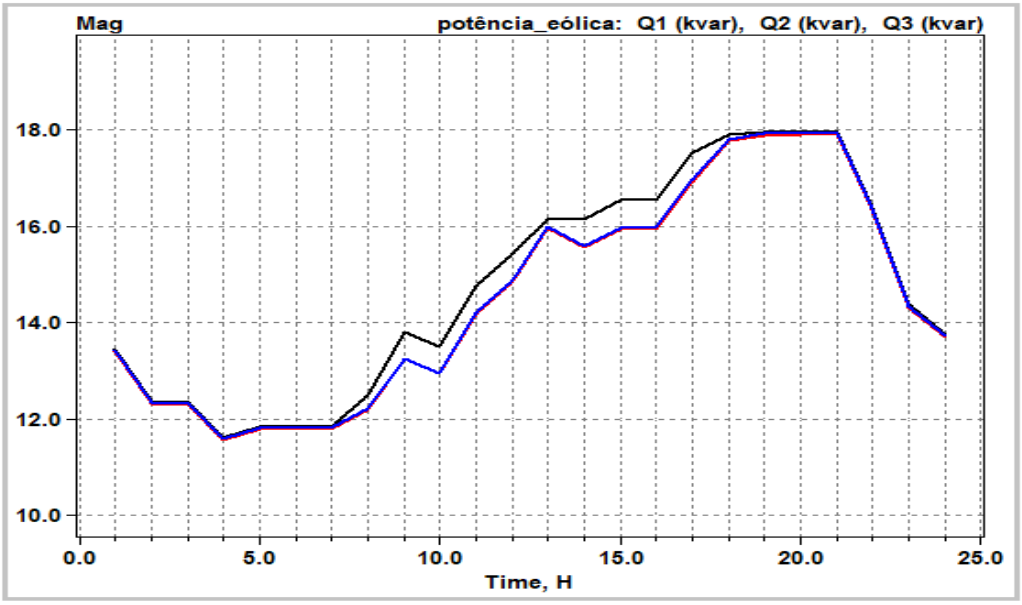


Figura 74 – Potência reativa



É importante observar na figura anterior que o sinal negativo (-) na função *Plot* do OpenDSS indica que o gerador está injetando potência ativa no sistema e por outro lado, que o mesmo está consumindo potência reativa do sistema.

Na Figura 75 são apresentados os dados de saída do *EnergyMeter* do gerador eólico durante 24 horas.

Figura 75 – Dados de saída do *EnergyMeter*

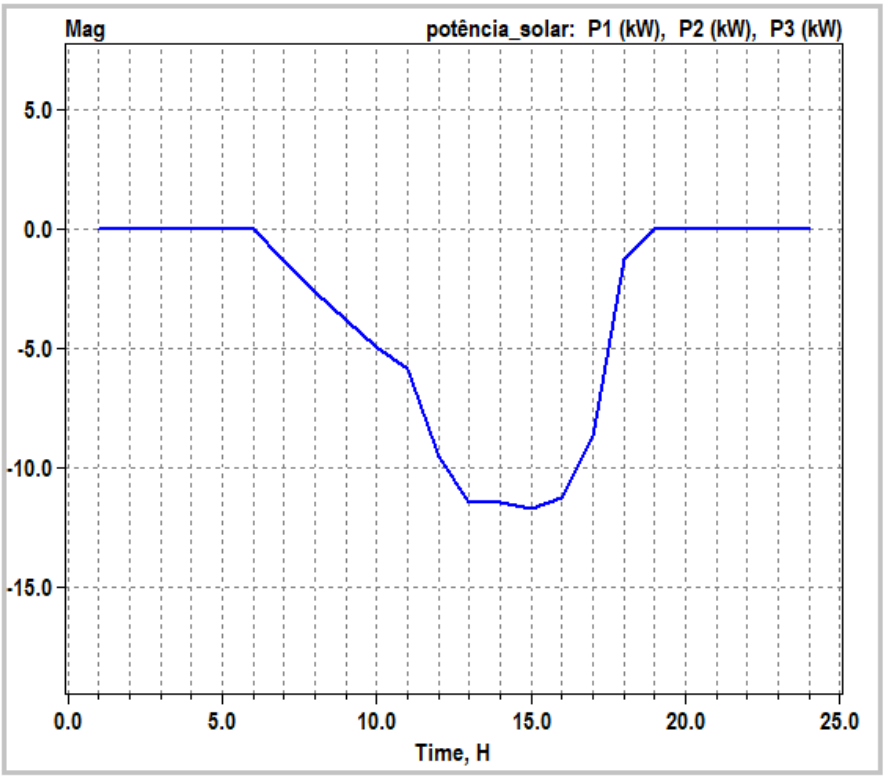
```
ENERGY METER VALUES

Registers:
Reg 1 = kWh
Reg 2 = kvarh
Reg 3 = Max kW
Reg 4 = Max kVA
Reg 5 = Zone kWh
Reg 6 = Zone kvarh
Reg 7 = Zone Max kW

Meter            Reg 1      Reg 2      Reg 3      Reg 4      Reg 5      Reg 6      Reg 7

gerador_eólico     2398      -1052        120        132      24679      11751       2266
```

4.3.3 Potência e os dados de saída do *EnergyMeter* do Gerador Fotovoltaico ao longo de 24 horas

Para visualizar o resultado das grandezas elétricas do gerador fotovoltaico, o usuário deve seguir os mesmos passos apresentados para o gerador eólico.

Na Figura 76 pode ser visualizado o perfil de potência no gerador fotovoltaico.

Figura 76 – Potência do gerador fotovoltaico



Na Figura 77 são apresentados os dados de saída do *EnergyMeter* do gerador fotovoltaico durante 24 horas.

Figura 77 – Dados de saída do EnergyMeter

```
ENERGY METER VALUES

Registers:
Reg 1 = kWh
Reg 2 = kvarh
Reg 3 = Max kW
Reg 4 = Max kVA
Reg 5 = Zone kWh
Reg 6 = Zone kvarh
Reg 7 = Zone Max kW
Reg 8 = Zone Max kVA

Meter          Reg 1     Reg 2     Reg 3     Reg 4     Reg 5     Reg 6     Reg 7     Reg 8

solar             26      -107        20        21     24453     11644      2249      2489
```

4.3.4 Comparação entre as perdas no sistema sem e com a presença de GD

Para visualizar as perdas em um equipamento ou em uma linha de distribuição o usuário deverá usar a função *EnergyMeter* e parametrizar o elemento desejado. Na Figura 78 é apresentado um exemplo parametrizado da Linha1. O usuário deve seguir os seguintes passos: *Show* → *EnergyMeter*.

Figura 78 - EnergyMeter

```
New EnergyMeter.Linha1  element=Line.Linha1  terminal=1
```

Na Tabela 6 são apresentadas as perdas em um período de 24 horas nas linhas de distribuição sem a presença de GD.

Tabela 6 - Perdas nas linhas sem a presença de GD

Equipamento	Perdas Totais [kWh]	Perdas Reativas [kvarh]	Percentual Total de Perdas [%]
Linha1	329	396	1,31
Linha2	229	196	1,00
Linha3	175	97	1,35
Linha4	41	19	0,51
Linha5	2	2	1,77

Na Tabela 7 são apresentadas as perdas em um período de 24 horas nas linhas de distribuição com a presença de GD.

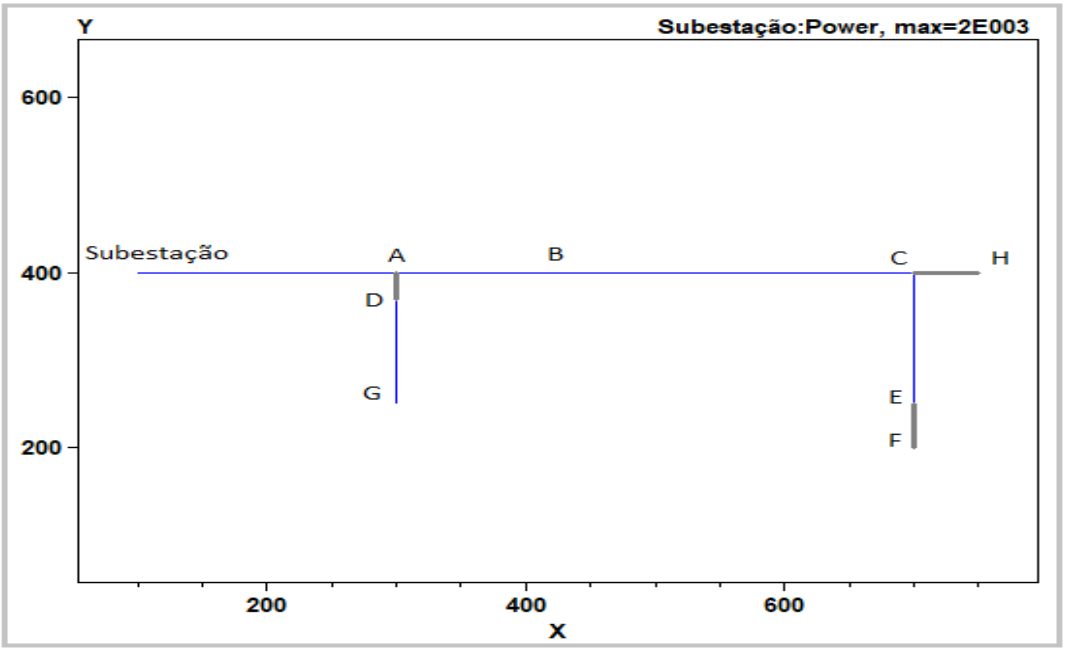
Tabela 7 - Perdas nas linhas com a presença de GD

Equipamento	Perdas Totais [kWh]	Perdas Reativas [kvarh]	Percentual Total de Perdas [%]
Linha1	296	375	1,32
Linha2	204	190	1,01
Linha3	155	101	1,50
Linha4	39	17	0,50
Linha5	2	2	1,77

5 SISTEMA DE GEORREFERENCIAMENTO

Outra maneira de visualização dos resultados no OpenDSS é através do sistema de georreferenciamento, desta forma o usuário poderá observar o fluxo de potência diretamente no gráfico. É possível visualizar a intensidade de potência em cada ramo ou nó do circuito, quanto maior e mais grossa é a linha azul, maior é o valor do fluxo de potência. Na Figura 79 é apresentado o diagrama do fluxo de potência do circuito teste com a presença de GD.

Figura 79 – Diagrama do Fluxo de Potência



O usuário deve serguir os seguintes passos para visualização do sistema de georreferenciamento. Primeiramente, é necessário possuir o arquivo *.csv com os dados da localização do sistem em relação ao eixo x e y. Na Figura 80 é apresentado o arquivo no excel dos dados do georreferenciamento do circuito teste.

Figura 80 – CIRCUITO_TESTE.csv

	A	B	C	D
1	Subestação, 100, 400			
2	A, 300, 400			
3	B, 400, 400			
4	C, 700, 400			
5	H, 750, 400			
6	D, 300, 370			
7	G, 300, 250			
8	E, 700, 250			
9	F, 700, 200			
10				
11				
12				
13				

Observa-se na figura anterior que a coluna A contém três informações separadas por vígulas: a primeira corresponde a todos os barramentos do sistema, a segunda corresponde ao eixo x, e a terceira ao eixo y. O usuário deverá chamar o arquivo (o mesmo deverá está na mesma pasta do projeto principal) através do comando *BusCoords*, conforme Figura 81.

Figura 81 - *BusCoords*

```
BusCoords CIRCUITO_TESTE.csv
```

Após o usuário inserir este comando o próximo passo é plotar o gráfico, para tanto, deve-se seguir os seguintes passos: Ctrl+A e Ctrl+D → *Plot* → *Circuits Plots* → *Circuit Plot*.

6 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Nota Técnica n° 0057/2014-SRD/ANEEL**. Aprimoramento de Metodologia de Cálculo de Perdas na Distribuição regulamentada no Módulo 7 – Cálculo de perdas na Distribuição do PRODIST. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0057_srd.pdf. Acesso em: 02 out. 2019.

DUGAN, R. C. **The Open Distribution System Simulator OpenDSS**. Disponível em: ftp://197.155.77.3/sourceforge/e/el/electricdss/OpenDSS/OpenDSSManual.pdf. Acesso em: 13 mai. 2019.

EPRI. **What is OpenDSS?** Disponível em: https://www.epri.com/#/pages/sa/opendss?lang=en. Acesso em: 22 abr. 2019.

FREITAS, Paulo R. R. **Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando software OpenDSS**. 189f. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.