

Roteiro Aula Prática



SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA AVANÇADOS

ROTEIRO DE AULA PRÁTICA

SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA AVANÇADOS

Unidade: Unidade 1 – Modelagem do Fluxo de Carga

Aula: Aula 1 – Modelagem de Linhas de Transmissão

OBJETIVOS

Definição dos objetivos da aula prática:

- Construir a matriz de admitância nodal (Y_{bus}) de um sistema elétrico de potência a partir dos parâmetros da rede;
- Calcular e interpretar a esparsidade da matriz de admitância utilizando ferramentas computacionais;
- Utilizar o GNU Octave para realizar cálculos com números complexos, manipular matrizes e visualizar sua estrutura de esparsidade;
- Relacionar a modelagem matemática do sistema elétrico com sua representação computacional.

SOLUÇÃO DIGITAL:

GNU Octave (Software Livre)

O GNU Octave é um ambiente computacional de código aberto voltado para computação numérica, programação científica e manipulação de matrizes. Possui sintaxe semelhante ao MATLAB, permitindo que algoritmos desenvolvidos em um ambiente possam ser facilmente adaptados ao outro. Na área de Sistemas Elétricos de Potência, o Octave é amplamente empregado para resolver sistemas lineares, manipular matrizes de admitância, executar algoritmos iterativos de fluxo de carga e realizar análises matriciais de forma eficiente. Nesta atividade será utilizado para efetuar operações com números complexos, montar a matriz de admitância nodal e visualizar sua esparsidade por meio do comando `spy()`.

PROCEDIMENTOS PRÁTICOS E APLICAÇÕES

Procedimento/Atividade nº 1

Montagem da Matriz de Admitância Nodal (Y)

Atividade proposta:

Modelar computacionalmente um sistema elétrico de potência em corrente alternada, realizando a conversão das impedâncias das linhas em admitâncias, construindo a matriz de admitância nodal (Y_{bus}) e analisando sua estrutura de esparsidade por meio do GNU Octave.

Procedimentos para a realização da atividade:

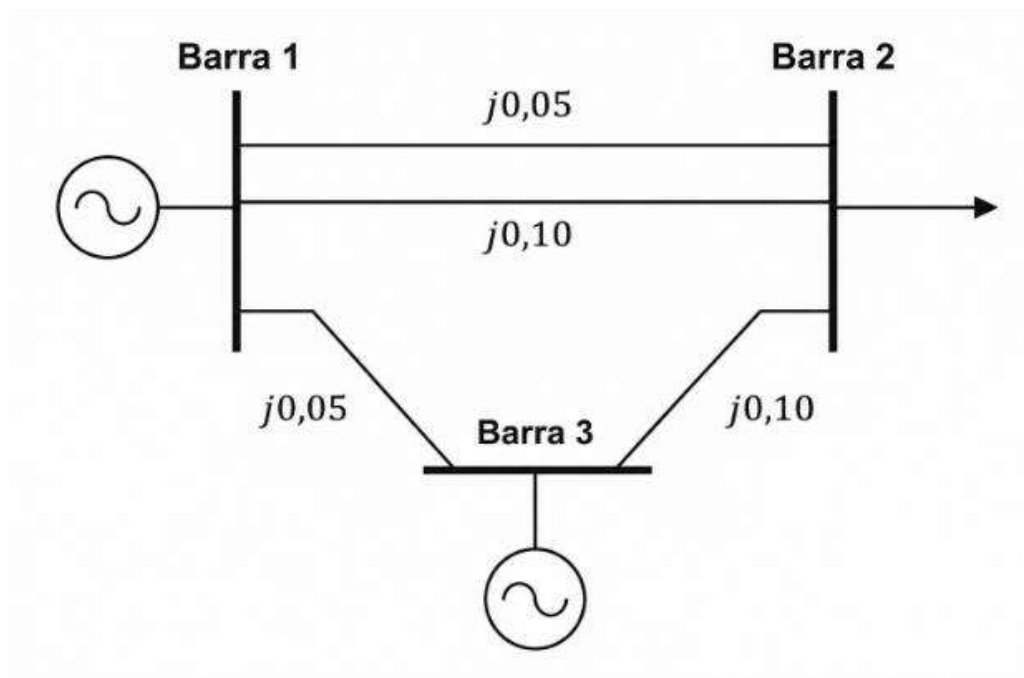
1. ANÁLISE DO SISTEMA:

Antes de iniciar os cálculos, observe atentamente o diagrama unifilar do sistema elétrico de potência apresentado na Figura 1. Identifique as três barras do sistema, as linhas de transmissão que interligam cada uma delas e os respectivos valores de impedância, expressos em por unidade (pu).

Durante essa análise, observe que as Barras 1 e 2 estão interligadas por duas linhas de transmissão em paralelo, com impedâncias de $j0,05$ pu e $j0,10$ pu. Além disso, a Barra 1 está conectada à Barra 3 por uma linha com impedância $j0,05$ pu, enquanto a Barra 2 está conectada à Barra 3 por uma linha com impedância $j0,10$ pu. A correta identificação dessas conexões será fundamental para a conversão das impedâncias em admitâncias e para a montagem da matriz de admitância nodal (Y_{bus}).

Antes de prosseguir para a próxima etapa, identifique em seu caderno todas as ligações existentes entre as barras e registre os respectivos valores de impedância de cada linha de transmissão. Essa organização facilitará o desenvolvimento das etapas seguintes da atividade.

Figura 1 – Sistema elétrico de potência de três barras utilizado para a modelagem da matriz de admitância nodal (Y_{bus}).



Fonte: Autor

2. CONVERSÃO DE VALORES:

Para a construção da matriz de admitância nodal (Y_{bus}), é necessário converter todas as impedâncias das linhas de transmissão em seus respectivos valores de admitância. A admitância (Y) representa o inverso da impedância (Z) e é obtida pela seguinte expressão:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Realize a conversão de todas as impedâncias do sistema apresentado na Figura 1 utilizando o GNU Octave. Essa etapa é fundamental, pois a matriz Ybus é construída a partir das admitâncias das linhas de transmissão.

Como exemplo, considere uma impedância igual a $j0,2$ pu. No GNU Octave, a unidade imaginária é representada pela letra i, equivalente ao j utilizado em Engenharia Elétrica. Lembre-se de substituir a vírgula pelo ponto na entrada dos valores numéricos.

Digite o seguinte comando no Octave:

$$Z = 0.2*i;$$

$$Y = 1/Z$$

O resultado esperado é uma admitância igual a $-j5$ pu, que o GNU Octave apresenta na forma retangular como: $Y = 0 - 5i$

$$\text{octave:1} > Z = 0.2*i;$$

$$Y = 1/Z$$

$$Y = 0 - 5i$$

Observação: Dependendo da versão e da configuração do GNU Octave, a quantidade de casas decimais exibidas pode variar. Entretanto, o resultado matemático permanecerá o mesmo.

Todas essas representações são equivalentes.

$Y = 0 - 5i$ ou $Y = 0 - 5.0000i$ ou $Y = 0.00000 - 5.00000i$

Antes de realizar a conversão das impedâncias do sistema elétrico apresentado na Figura 1, observe o exemplo de desenvolvimento matemático a seguir. O procedimento demonstra, passo a passo, como obter a admitância a partir do inverso da impedância, servindo como referência para os cálculos que serão desenvolvidos nas próximas etapas da atividade.

Figura 2 – Exemplo de conversão matemática

$$Y = \frac{1}{Z}$$

$$Y = \frac{1}{j0,2}$$

$$\frac{1}{j} = -j$$

$$Y = -j \left(\frac{1}{0,2} \right)$$

$$Y = -j5 \text{ pu}$$

$$Y = -j5 \text{ pu}$$

Figura 3 – Exemplo da execução no GNU Octave

```
octave:1> Z = 0.2*i;  
Y = 1/Z  
Y = 0 - 5i
```

Repita esse procedimento para todas as impedâncias apresentadas na Figura 1 e registre os valores das admitâncias obtidas, pois eles serão utilizados na montagem da matriz de admitância nodal na próxima etapa.

- j0,05
- j0,10
- j0,05
- j0,10

Como existem valores de impedância repetidos no sistema elétrico apresentado, realize a conversão apenas uma vez para cada valor distinto de impedância e utilize os resultados correspondentes nas linhas em que eles se repetem.

3. REESCRITA DO CIRCUITO:

Após calcular as admitâncias correspondentes às impedâncias das linhas de transmissão, redesenhe o sistema elétrico apresentado na Figura 1, substituindo cada valor de impedância pelo respectivo valor de admitância obtido na etapa anterior.

Mantenha a mesma topologia do sistema elétrico, preservando todas as conexões entre as barras e alterando apenas os valores das linhas de transmissão. Essa representação servirá de base para a construção da matriz de admitância nodal (Y_{bus}) na próxima etapa da atividade. Ao concluir o redesenho, verifique se todas as linhas de transmissão foram corretamente representadas e se os valores de admitância correspondem às impedâncias convertidas no procedimento anterior.

4. MONTAGEM DA MATRIZ Y:

Com base nas admitâncias calculadas e no circuito reescrito na etapa anterior, construa a matriz de admitância nodal (Y_{bus}) correspondente ao sistema elétrico apresentado na Figura 1. Para a montagem da matriz, considere os procedimentos estudados na disciplina de Sistemas Elétricos de Potência Avançados. Lembre-se de que os elementos da diagonal principal são obtidos pela soma de todas as admitâncias conectadas à respectiva barra, enquanto os elementos fora da diagonal correspondem ao negativo da soma das admitâncias que interligam diretamente os pares de barras.

Antes de iniciar a construção da matriz, identifique todas as conexões existentes entre as barras do sistema e verifique se há linhas de transmissão em paralelo, pois essas admitâncias deverão ser consideradas conjuntamente durante a montagem da matriz.

Após concluir a matriz, revise todos os elementos calculados, verificando se os valores da diagonal principal e os elementos fora da diagonal representam corretamente a topologia do sistema elétrico analisado.

Figura 4 – Modelo da matriz de admitância nodal do sistema elétrico

$$\mathbf{Y}_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Fonte: Autor

5. ENTRADA DE DADOS NO SOFTWARE:

Após a montagem da matriz de admitância nodal, realize a inserção dos dados no software GNU Octave, utilizando a estrutura matricial apresentada a seguir.

A matriz deve ser definida no Octave utilizando colchetes [], com os elementos separados por espaços ou vírgulas e as linhas separadas por ponto e vírgula (;).

No software Octave, a entrada dos dados pode ser realizada pelo comando:

```
Ybus = [Y11 Y12 Y13;  
        Y21 Y22 Y23;  
        Y31 Y32 Y33]
```

Figura 5 – Exemplo de Matriz no GNU Octave

```
octave:1> Ybus = [Y11 Y12 Y13;  
                  Y21 Y22 Y23;  
                  Y31 Y32 Y33]
```

Fonte: Autor

Observação:

Substitua os termos genéricos Y11, Y12, ..., Y33Y pelos valores numéricos calculados a partir das impedâncias das linhas de transmissão do sistema estudado.

Figura 6 - Modelo para preenchimento na atividade:

$$\mathbf{Y}_{bus} = \begin{bmatrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{bmatrix}$$

Fonte: Autor

O resultado apresentado pelo software deverá corresponder à matriz de admitância nodal montada anteriormente, permitindo a validação dos cálculos realizados e a utilização dos dados nas etapas seguintes de análise do sistema elétrico de potência.

6. ANÁLISE DE ESPARSIDADE:

Obtenha a representação gráfica da esparsidade da matriz de admitância nodal montada no Octave. Para isso, utilize o comando spy, conforme apresentado abaixo:

spy(Ybus)

Figura 7 – Comando spy(Ybus) no GNU Octave

```
octave:3> spy(Ybus)
```

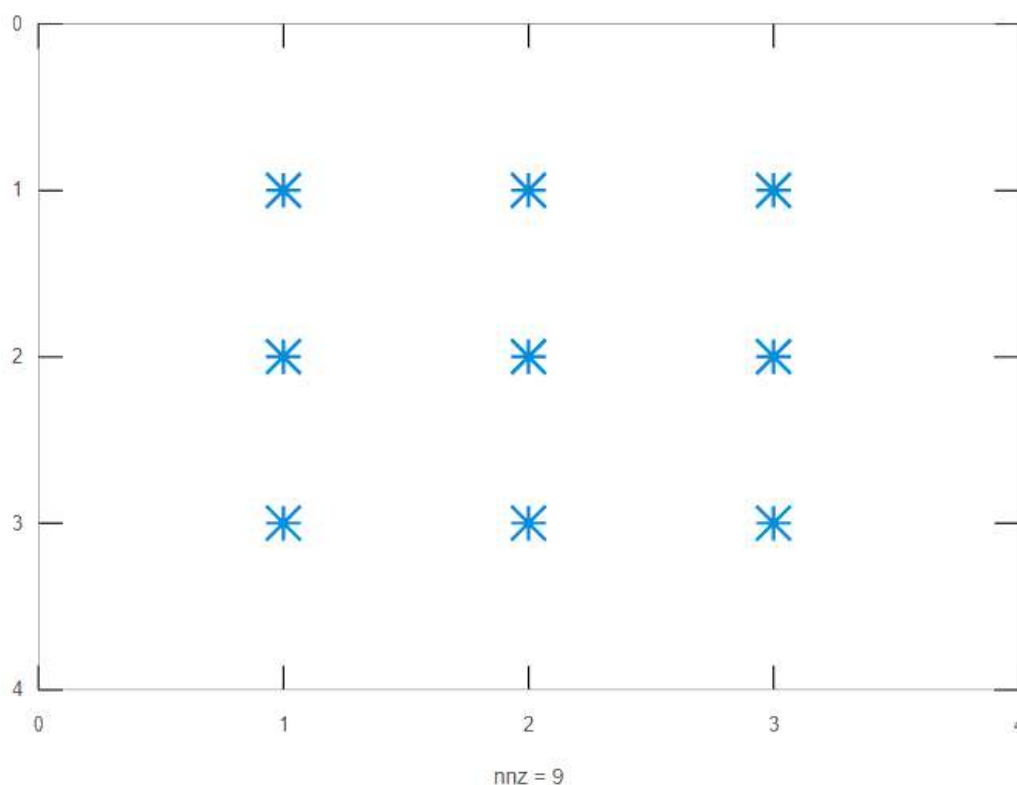
Fonte: Autor

O comando spy no Octave permite visualizar o padrão de esparsidade de uma matriz, representando graficamente a localização dos elementos diferentes de zero. Os elementos não nulos da matriz são indicados por pontos, enquanto as posições correspondentes aos elementos nulos permanecem em branco.

Essa representação permite identificar a estrutura da matriz de admitância nodal e observar a quantidade de elementos efetivamente utilizados no processamento matemático do sistema elétrico de potência.

Para a matriz utilizada como exemplo, o resultado obtido será apresentado conforme a Figura 6:

Figura 8 – Representação gráfica da esparsidade da matriz Ybus utilizando o comando spy no Octave



Fonte: Autor

Checklist:

- ✓ Instalar corretamente o GNU Octave.

- ✓ Verificar o funcionamento do software.
- ✓ Converter todas as impedâncias em admitâncias utilizando números complexos.
- ✓ Conferir os resultados obtidos.
- ✓ Representar o circuito utilizando as admitâncias calculadas.
- ✓ Construir corretamente a matriz Y .
- ✓ Inserir a matriz no Octave.
- ✓ Gerar o gráfico de esparsidade.
- ✓ Salvar as imagens produzidas.
- ✓ Organizar os resultados para elaboração do relatório.

RESULTADOS

Resultados do experimento:

Ao final desta aula prática, você deverá entregar um relatório (em Word).

O relatório deverá conter:

- ✓ Objetivo da prática.
- ✓ Conversão completa das impedâncias em admitâncias.
- ✓ Circuito redesenhado.
- ✓ Desenvolvimento da matriz Y .
- ✓ Código utilizado no Octave.
- ✓ Figura da esparsidade obtida.
- ✓ Discussão dos resultados.
- ✓ Conclusão da atividade.

Resultados de Aprendizagem:

Ao final desta prática, o estudante será capaz de compreender a importância da matriz de admitância nodal na modelagem e análise de sistemas elétricos de potência em corrente alternada. Além disso, será capaz de converter parâmetros elétricos para o domínio da admitância, construir a matriz de admitância a partir da topologia da rede e interpretar sua estrutura matemática. O estudante também desenvolverá habilidades na utilização do GNU Octave para manipulação de números complexos, operações matriciais e visualização da esparsidade de matrizes, consolidando os fundamentos necessários para estudos de fluxo de carga e outras análises computacionais em sistemas elétricos de potência. Espera-se ainda que o estudante execute os procedimentos computacionais de forma organizada e criteriosa, verificando a consistência dos cálculos realizados, a correta representação dos números complexos, a estrutura da matriz obtida e a interpretação dos resultados gerados pelo software, desenvolvendo autonomia e rigor técnico na resolução de problemas de engenharia.

ROTEIRO DE AULA PRÁTICA

SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA AVANÇADOS

Unidade: Unidade 1 – Modelagem do Fluxo de Carga

Aula: Aula 2 - Modelagem do Fluxo de Carga

OBJETIVOS

Definição dos objetivos da aula prática:

- Modelar um sistema elétrico de potência para análise do fluxo de potência linearizado (Fluxo CC) a partir dos parâmetros da rede elétrica;
- Calcular os fluxos de potência ativa e os ângulos das tensões nas barras utilizando o modelo matemático do fluxo de carga linearizado;
- Utilizar o PowerWorld Simulator para realizar a modelagem, simulação e análise do comportamento operacional de sistemas elétricos de potência;
- Relacionar os conceitos teóricos do fluxo de carga com os resultados obtidos na simulação computacional do sistema elétrico.

SOLUÇÃO DIGITAL:

PowerWorld Simulator (Software Livre/Educacional)

O PowerWorld Simulator é um software computacional interativo desenvolvido para a modelagem, simulação e análise de sistemas elétricos de potência, especialmente redes de alta tensão. A ferramenta permite representar graficamente os elementos que compõem um sistema elétrico, como barras, linhas de transmissão, transformadores, geradores e cargas, possibilitando a avaliação do comportamento operacional da rede.

O software é utilizado em estudos de fluxo de carga, análise de estabilidade, curto-circuito, contingências operacionais e demais aplicações relacionadas ao planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. Por meio de sua interface gráfica, permite acompanhar as condições de operação da rede em diferentes cenários, considerando variações de geração, demanda e configuração do sistema.

No contexto desta atividade, o PowerWorld Simulator será utilizado como ferramenta de apoio para a modelagem e análise do fluxo de carga, permitindo a visualização dos resultados obtidos e a interpretação do comportamento das grandezas elétricas do sistema estudado.

PROCEDIMENTOS PRÁTICOS E APLICAÇÕES

Procedimento/Atividade nº 1

Atividade proposta:

Aplicar os conhecimentos de Sistemas Elétricos de Potência Avançados para modelar um sistema elétrico básico, realizar a análise da rede e calcular o fluxo de potência ativa utilizando o método linearizado (Fluxo CC).

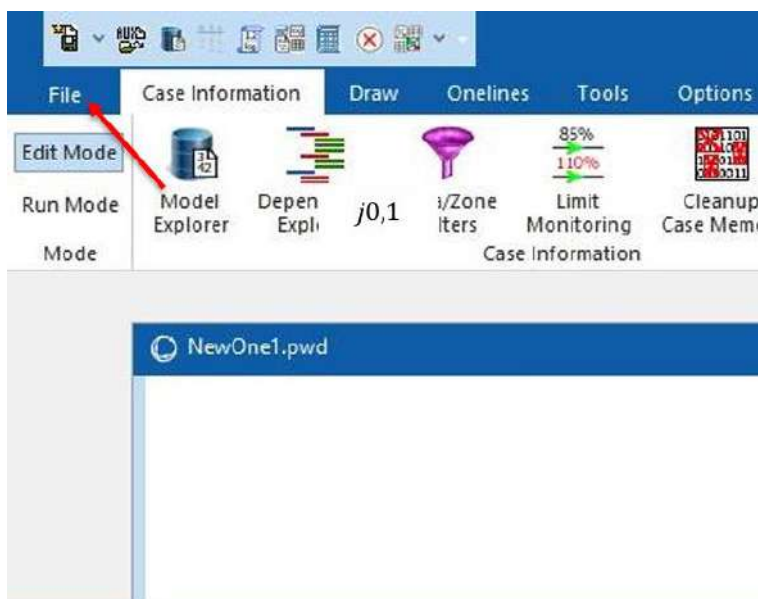
Procedimentos para a realização da atividade:

1. INÍCIO DO PROJETO:

Abra o software PowerWorld Simulator para iniciar a modelagem do sistema elétrico. Na barra de ferramentas superior, selecione a opção "File" para acessar as opções de criação ou abertura de um projeto.

A Figura 1 demonstra o acesso ao menu "File" do PowerWorld Simulator, utilizado para iniciar um novo caso de estudo ou carregar uma configuração existente. A partir dessa opção, o usuário poderá criar o modelo do sistema elétrico, inserindo posteriormente os elementos da rede, como barras, geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 1 – Tela inicial do PowerWorld Simulator para criação de um novo projeto



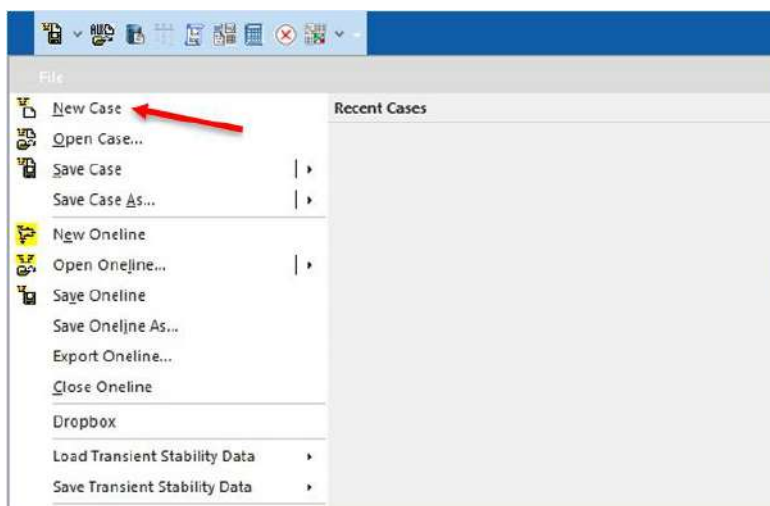
Fonte: Autor

2. CONFIGURAÇÃO DA BASE:

Acesse o menu "File" e selecione a opção "New Case" para iniciar a criação de uma nova base de dados no PowerWorld Simulator. Ao executar esse comando, será aberta uma nova janela destinada à configuração inicial do caso de estudo, onde serão definidos os parâmetros básicos do sistema elétrico a ser modelado.

A Figura 2 apresenta o menu "File" do PowerWorld Simulator com a opção "New Case" selecionada. Essa função permite criar uma nova base de simulação, iniciando o processo de modelagem do sistema elétrico de potência que será utilizado no estudo do fluxo de potência linearizado.

Figura 2 – Seleção da opção New Case para criação de uma nova base de estudo no PowerWorld Simulator



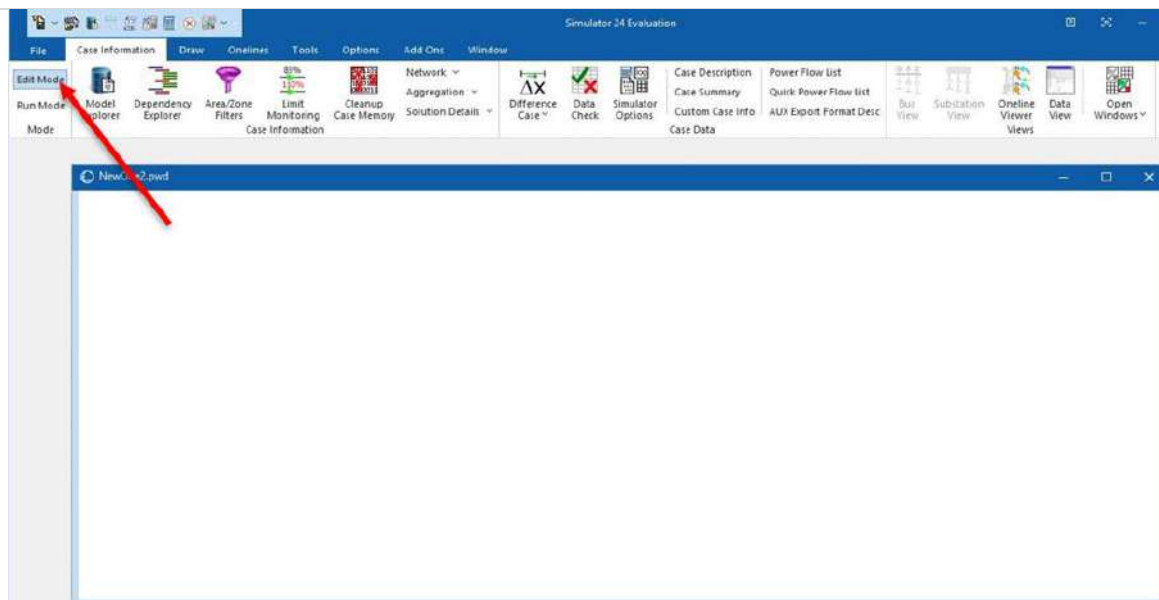
Fonte: Autor

3. CRIAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO:

Após a criação de um novo caso de estudo, será apresentada uma tela em branco no modo Edit Mode, ambiente destinado à construção e configuração do modelo do sistema elétrico. Nessa área serão inseridos os elementos da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, conforme as características do sistema a ser analisado.

A Figura X apresenta o ambiente de edição (Edit Mode) do PowerWorld Simulator após a criação de um novo caso. Essa área permite a inserção dos componentes elétricos e a montagem gráfica do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência linearizado.

Figura 3 – Área de edição para criação do modelo do sistema elétrico no PowerWorld Simulator



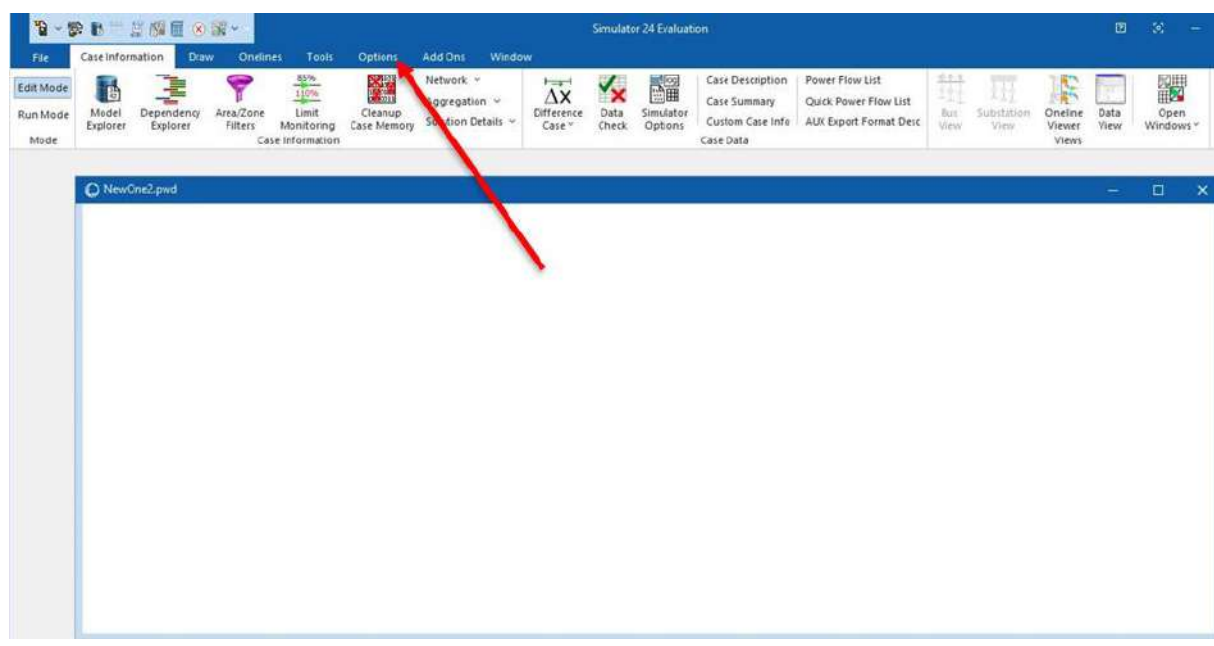
Fonte: Autor

4. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Nesta etapa, deve-se definir a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico em por unidade (pu). Para realizar essa configuração, acesse o menu "Options" do PowerWorld Simulator e ajuste os parâmetros necessários conforme as características do sistema analisado.

A Figura 4 apresenta o menu "Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para acessar as configurações gerais da simulação. Nesta etapa, será definida a base de potência do sistema em valores por unidade (pu), parâmetro fundamental para a padronização dos cálculos elétricos.

Figura 4 – Acesso às configurações de base de potência no PowerWorld Simulator

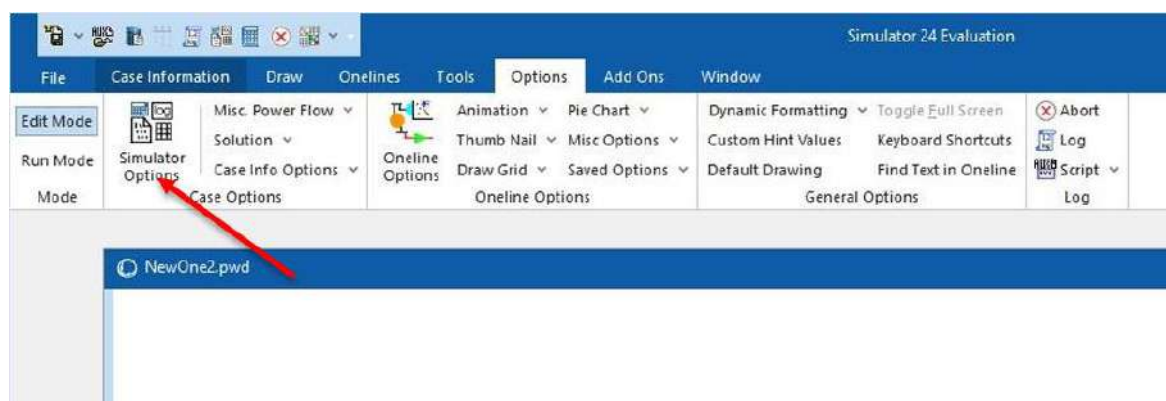


5. CONFIGURAÇÃO DAS OPÇÕES DO SIMULADOR:

Nesta etapa, acesse o menu "Simulator Options" do PowerWorld Simulator para abrir a janela de configurações do ambiente de simulação. Essas opções permitem ajustar parâmetros gerais utilizados na modelagem e execução dos estudos de fluxo de potência.

A Figura 5 apresenta o menu de acesso às opções de configuração do simulador (Simulator Options) no PowerWorld Simulator. Essa janela permite definir parâmetros gerais da simulação, que serão utilizados durante a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 5 – Acesso ao menu Simulator Options do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

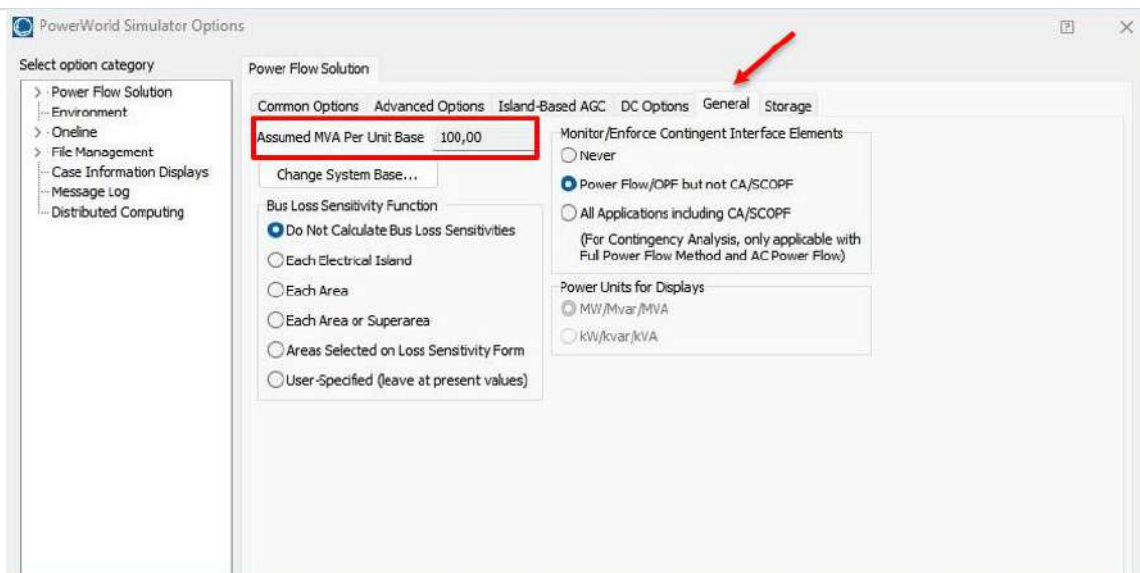
6. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Ao acessar o menu "Simulator Options", uma nova janela será aberta. Selecione a aba "General" e localize o campo "Assumed MVA Per Unit Base".

Nesse campo, informe o valor de 100,00 MVA, que será utilizado como base de potência do sistema para os cálculos realizados pelo simulador em valores por unidade (pu).

A Figura 6 apresenta a janela de configuração Simulator Options, na aba General, destacando o campo "Assumed MVA Per Unit Base", onde é definida a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico. O valor de 100 MVA é uma referência usual em estudos de sistemas de potência e será empregado nos cálculos do fluxo de potência linearizado.

Figura 6 – Configuração da base de potência no PowerWorld Simulator

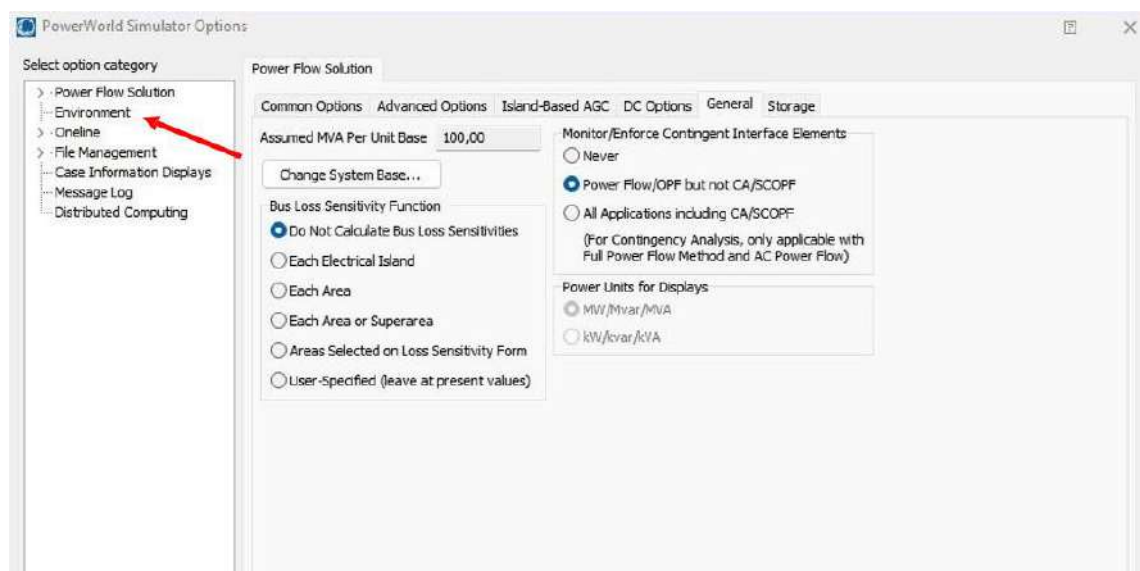


Fonte: Autor

7. CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Na mesma janela de configurações do Simulator Options, selecione a opção "Environment" para acessar os parâmetros relacionados ao ambiente de simulação do PowerWorld Simulator. A Figura 7 apresenta a janela Simulator Options com a seleção da aba "Environment", utilizada para configurar parâmetros relacionados ao ambiente de execução da simulação. Essas configurações complementam a preparação do software para a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 7 – Acesso às configurações de ambiente do PowerWorld Simulator



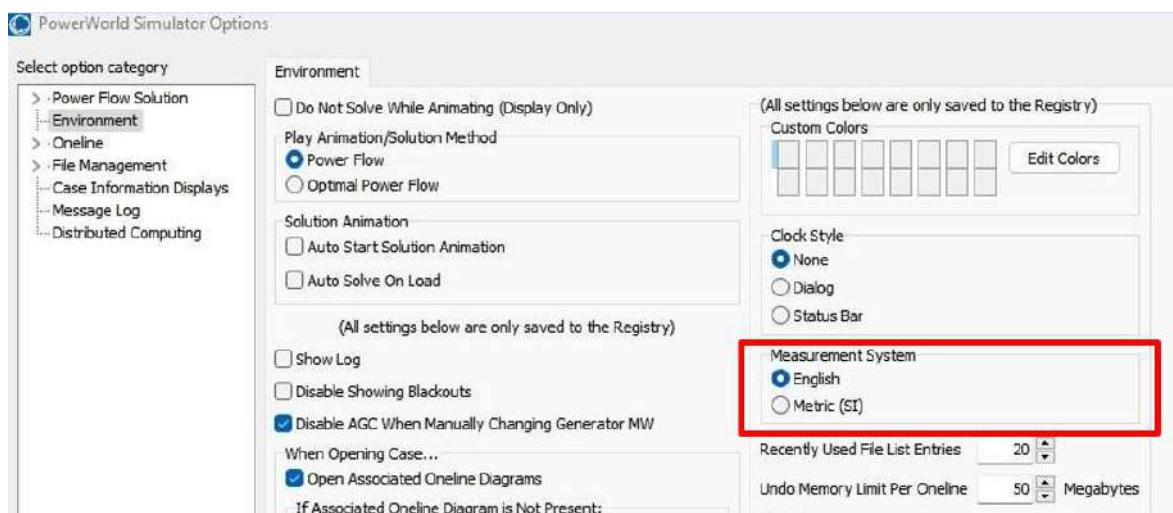
Fonte: Autor

8. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADES

Na aba "Environment", selecione a opção "Metric (SI)" para configurar o sistema de unidades utilizado pelo software. Após realizar a seleção, clique em "OK" para confirmar as alterações e aplicar as configurações definidas.

A Figura 8 apresenta a configuração do sistema de unidades na aba "Environment" do PowerWorld Simulator. A opção "Metric (SI)" define a utilização do Sistema Internacional de Unidades, padronizando a representação das grandezas elétricas e físicas utilizadas durante a modelagem e análise do sistema.

Figura 8 – Seleção do sistema de unidades Metric (SI) no PowerWorld Simulator



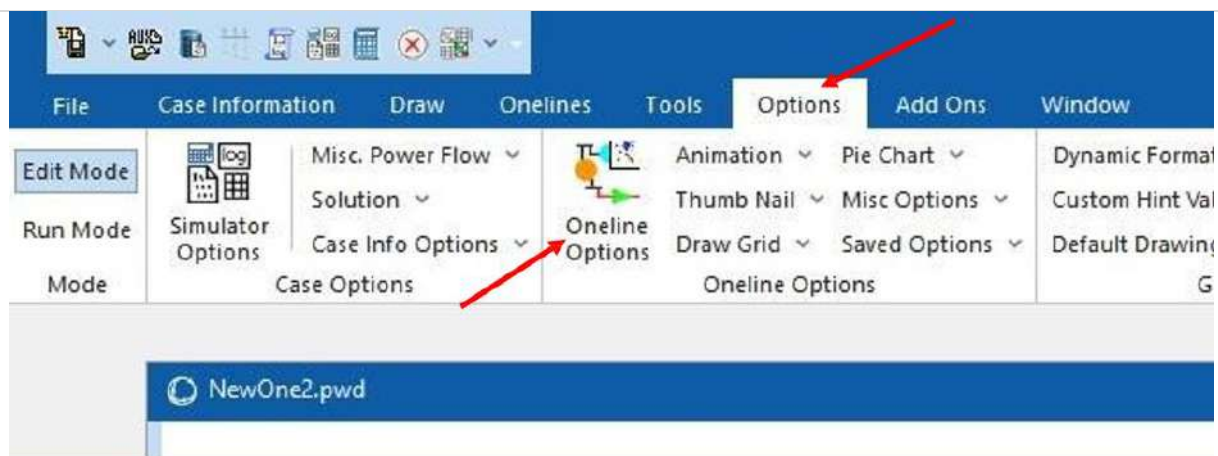
Fonte: Autor

9. CONFIGURAÇÃO DO DIAGRAMA UNIFILAR

Clique novamente no menu "Options" e, em seguida, selecione a opção "Online Options" para acessar as configurações de visualização do diagrama unifilar do sistema elétrico.

A Figura 9 apresenta o acesso ao menu "Online Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para configurar a forma de representação gráfica do sistema elétrico no diagrama unifilar. Essas opções permitem ajustar aspectos de visualização dos elementos da rede durante a montagem e análise do fluxo de potência.

Figura 9 – Acesso às configurações do diagrama unifilar no PowerWorld Simulator



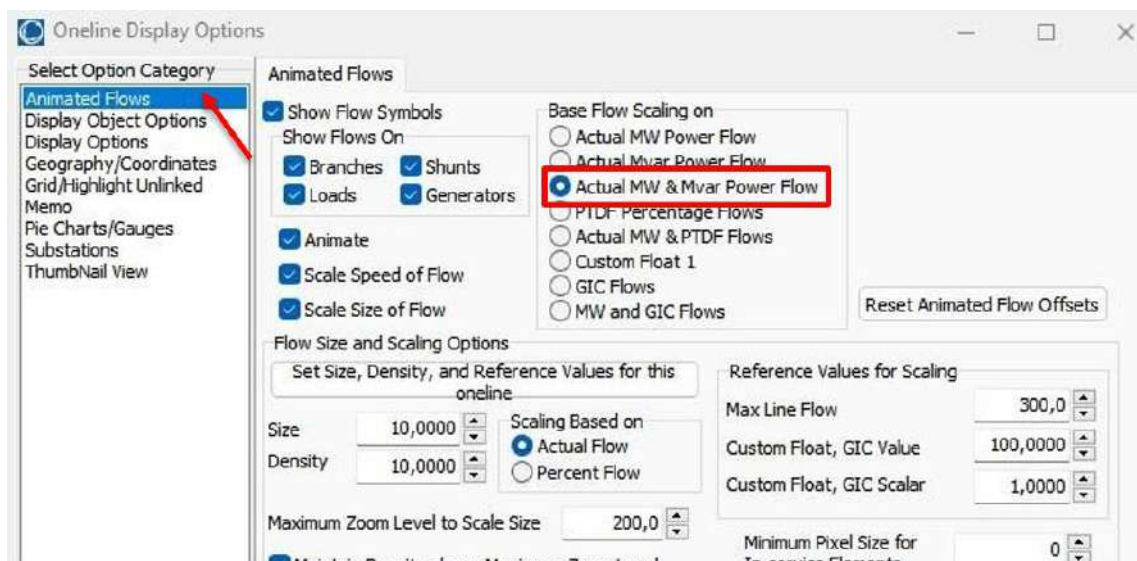
Fonte: Autor

10. CONFIGURAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO DOS FLUXOS DE POTÊNCIA

Na janela "Online Options", selecione a opção "Animated Flows" para habilitar a visualização dinâmica dos fluxos no diagrama unifilar. Em seguida, marque as opções "Actual MW" e "Mvar Power Flow", permitindo a exibição dos fluxos de potência ativa e reativa no sistema. Após realizar as configurações desejadas, clique em "Apply" para aplicar as alterações e, posteriormente, em "OK" para confirmar as configurações.

A Figura 10 apresenta a janela "Online Options", na qual são configuradas as opções de visualização dos fluxos de potência no diagrama unifilar. A seleção de "Animated Flows", "Actual MW" e "Mvar Power Flow" permite acompanhar graficamente a transferência de potência ativa e reativa entre os elementos do sistema elétrico.

Figura 10 – Configuração da visualização dos fluxos de potência no PowerWorld Simulator



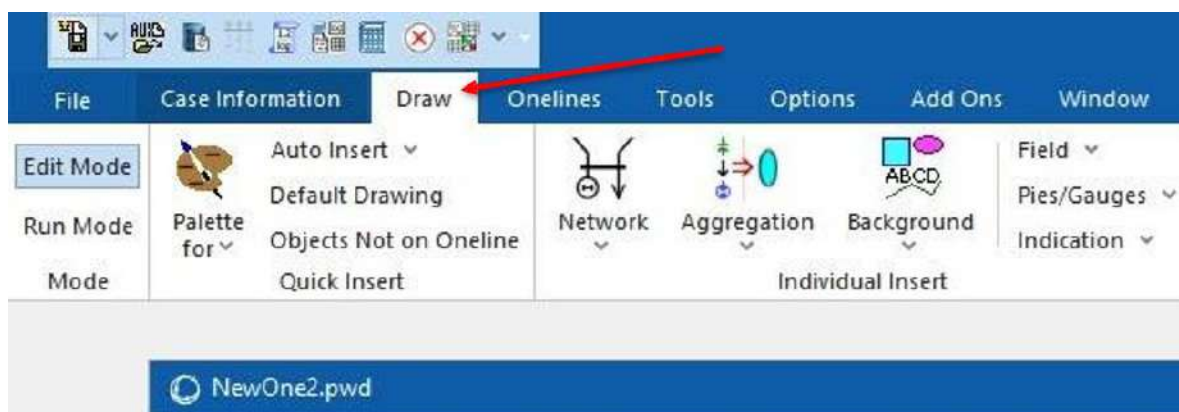
Fonte: Autor

11. MONTAGEM DO DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA

Nesta etapa, inicia-se a representação gráfica do sistema elétrico a ser simulado. Para isso, acesse o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, que disponibiliza as ferramentas necessárias para inserção e organização dos elementos da rede elétrica.

A Figura 11 apresenta o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, utilizado para realizar a montagem gráfica do sistema elétrico. Por meio dessas ferramentas, é possível inserir os componentes da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, formando o diagrama unifilar utilizado na simulação.

Figura 11 – Acesso às ferramentas de desenho do sistema no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

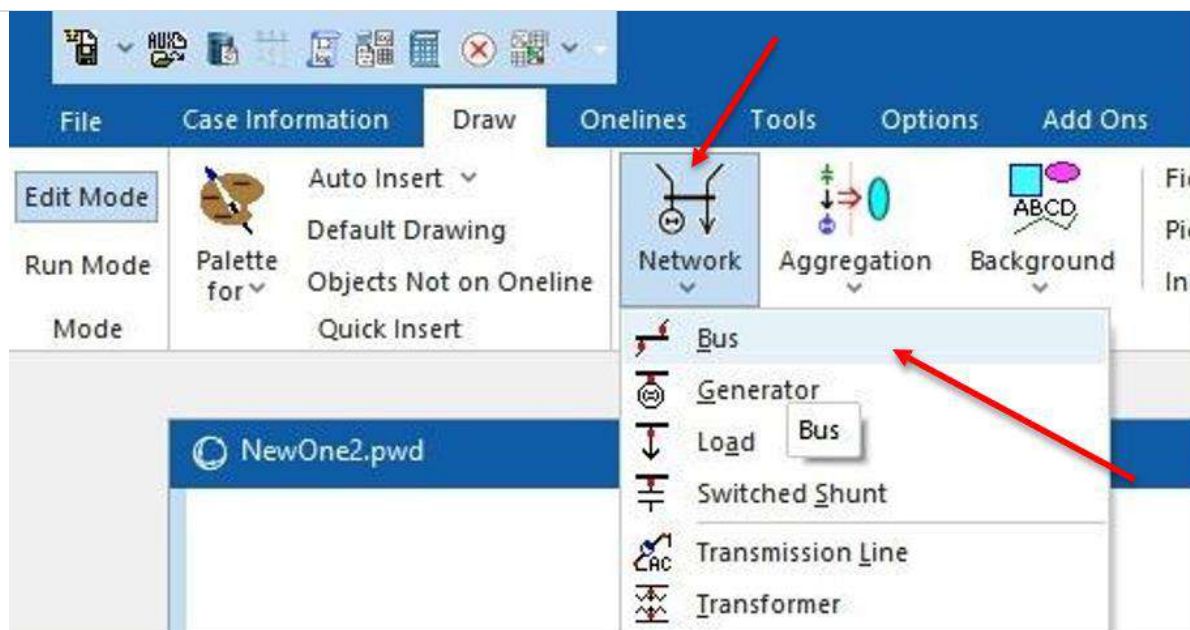
12. INSERÇÃO DA BARRA DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesta etapa, inicia-se a construção do sistema elétrico por meio da inserção das barras que representam os nós da rede. Para adicionar uma barra ao diagrama unifilar, acesse o menu "Network" e selecione a opção "Bus".

Após a seleção, a barra poderá ser posicionada no ambiente de edição do PowerWorld Simulator, dando início à montagem do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência.

A Figura 12 apresenta o procedimento de inserção de uma barra (Bus) no ambiente de modelagem do PowerWorld Simulator. As barras representam os pontos de conexão do sistema elétrico, onde são associados elementos como geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 12 – Inserção de uma barra no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

13. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA BARRA

Após inserir a barra no diagrama unifilar, clique sobre a área de edição para abrir a janela de configuração do elemento. Nesta etapa, devem ser definidos os parâmetros elétricos da barra conforme as características do sistema analisado.

Configure a tensão nominal da barra para 138 kV e ajuste os demais campos conforme os valores apresentados na tela de parâmetros.

A Figura 13 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de uma barra no PowerWorld Simulator. Nessa etapa são definidos dados elétricos importantes, como a tensão nominal do barramento, que neste estudo será considerada igual a 138 kV, além de outros parâmetros necessários para a modelagem do sistema elétrico.

Figura 13 – Janela de configuração dos parâmetros da barra no PowerWorld Simulator

Bus Options

Bus Number: 1
 Bus Name: 1
 Nominal Voltage: 138,0000 kV
 Labels ...: no labels

Find By Number
 Find By Name
 Find ...

	Number	Name
Area	1	1
Balancing Authority	1	1
Zone	1	1
Owner	1	1
Substation		
Data Maintainer		

View Area Dialog
 View Zone Dialog
 View Owner Dialog
 View Substation Dialog

Bus Information | Limits | Display | Attached Devices | Geography | Custom | Stability

Orientation:
☐ Right
☒ Up
☐ Left
☐ Down

Shape:
☒ Rectangle
☐ Ellipse

Size: 5,00
 Width: 0,300
☐ Scale Width with Size

Link to New Bus

☐ Allow to Act as a Fixed Number Bus (impacts auto insertion routines)

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

14. CONFIGURAÇÃO DA BARRA DE REFERÊNCIA (SLACK BUS)

Na janela de configuração da barra, acesse a opção "Bus Information" para realizar a definição do tipo de barra no sistema elétrico. Selecione a caixa "System Slack Bus" e confirme a alteração clicando em "OK".

A barra configurada como Slack Bus será utilizada como referência angular do sistema, sendo responsável pelo balanço entre a geração e o consumo de potência durante a solução do fluxo de potência.

A Figura 14 apresenta a janela "Bus Information", destacando a opção "System Slack Bus", utilizada para definir a barra de referência do sistema elétrico. Essa configuração estabelece a barra responsável por fornecer a referência de ângulo de tensão e pelo ajuste do balanço de potência durante os cálculos do fluxo de carga.

Figura 14 – Configuração da barra de referência (System Slack Bus) no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number 1 Find By Number

Bus Name 1 Find By Name

Nominal Voltage 138,00 kV Find ...

Labels ...

	Number	Name	
Area	1	1	View Area Dialog
Balancing Authority	1	1	
Zone	1	1	View Zone Dialog
Owner	1		View Owner Dialog
Substation			View Substation Dialog
Data Maintainer			

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.) 1,00 Bus Voltage Regulator Devices

Angle (degrees) 0,00

☒ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

15. INSERÇÃO E CONFIGURAÇÃO DA SEGUNDA BARRA DO SISTEMA

Nesta etapa, deve-se inserir uma nova barra no sistema elétrico, correspondente à Barra 2. A nova barra deverá ser configurada com tensão nominal de 138 kV, mantendo a mesma base da barra de referência.

Na configuração da barra, não selecione a opção "System Slack Bus", pois esta barra não será utilizada como referência do sistema. Defina a magnitude da tensão como 1 pu e o ângulo de tensão como 30°, conforme apresentado na Figura 15.

A Figura 15 apresenta a janela de configuração da segunda barra do sistema elétrico.

Diferentemente da barra de referência, esta barra não possui a função de Slack Bus, sendo definida com tensão de 1 pu e ângulo de 30° para compor o modelo utilizado na análise do fluxo de potência linearizado.

Figura 15 – Configuração da segunda barra do sistema no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number 1 Find By Number

Bus Name 1 Find By Name

Nominal Voltage 138,00 kV Find ...

Labels ...

Area Change Number 1 Name 1 View Area Dialog

Balancing Authority Change 1 1 View Zone Dialog

Zone Change 1 1 View Owner Dialog

Owner Change 1 View Substation Dialog

Substation Change

Data Maintainer Change

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.) 1,00

Angle (degrees) 0,00

Bus Voltage Regulator Devices

☒ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

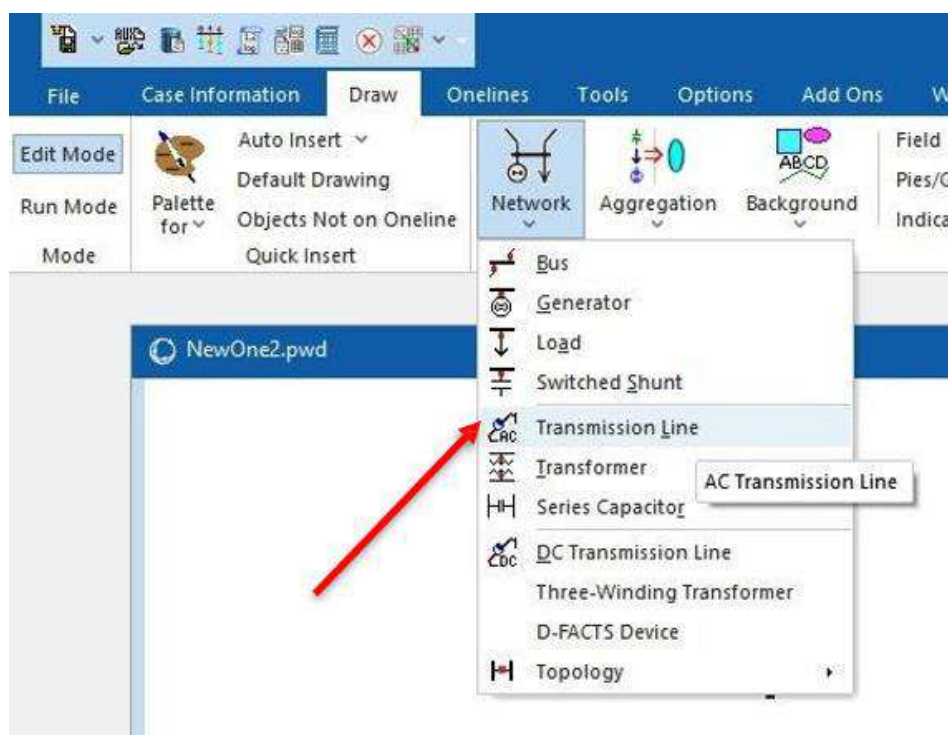
16. INSERÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Nesta etapa, deve-se realizar a interligação entre as barras do sistema elétrico por meio da inserção de uma linha de transmissão. Para isso, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Transmission Line".

Após selecionar o elemento, conecte a linha de transmissão entre as barras previamente criadas, estabelecendo a conexão necessária para a análise do fluxo de potência.

A Figura 16 apresenta o procedimento de inserção de uma linha de transmissão no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Esse elemento representa o ramo elétrico responsável pela conexão entre as barras do sistema, permitindo o fluxo de potência entre os nós da rede.

Figura 16 – Inserção da linha de transmissão entre as barras no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

17. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Após selecionar o elemento "Transmission Line", clique sobre a Barra 1 e arraste até a Barra 2, realizando dois cliques para finalizar a conexão da linha de transmissão.

Ao concluir a ligação, será aberta uma janela de configuração dos parâmetros do elemento. Informe a resistência (R) da linha como 0 pu e a reatância (X) como 0,1 pu. Após inserir os valores, clique em "OK" para confirmar as configurações.

A Figura 17 apresenta a janela de configuração da linha de transmissão inserida entre as barras do sistema. Nessa etapa são definidos os valores de resistência e reatância do elemento, parâmetros utilizados pelo PowerWorld Simulator para realizar os cálculos do fluxo de potência.

Figura 17 – Configuração dos parâmetros elétricos da linha de transmissão

Branch Options

From Bus: 1 To Bus: 2 Circuit: 1

Number: 1 Name: 1 Area Name: 1 (1) Nominal kV: 138,0

Find By Numbers Find By Names Find ...

☒ From End Metered ☒ Default Owner (Same as From Bus)

Labels ...

Custom Parameters Stability Series Capacitor Fault Info Geography

Display

Status: ☐ Open ☒ Closed

Branch Device Type: Line

☒ Allow Consolidation

Length: 0,00

Calculate Impedances >

Normal Status: ☐ Open ☒ Closed

Per Unit Impedance Parameters

Series Resistance (R)	0,000000
Series Reactance (X)	0,1
Shunt Charging (B)	0,000000
Shunt Conductance (G)	0,000000

☐ Has Line Shunts Line Shunts

MVA Limits

Limit A	0.000
Limit B	0.000
Limit C	0.000
Limit D	0.000
Limit E	0.000
Limit F	0.000
Limit G	0.000
Limit H	0.000
Limit I	0.000
Limit J	0.000
Limit K	0.000

Convert Line to Transformer Exchange From and To Buses

D-FACTS Devices on the Line ☐ Has D-FACTS

OK Save Save to Aux Cancel Help

Fonte: Autor

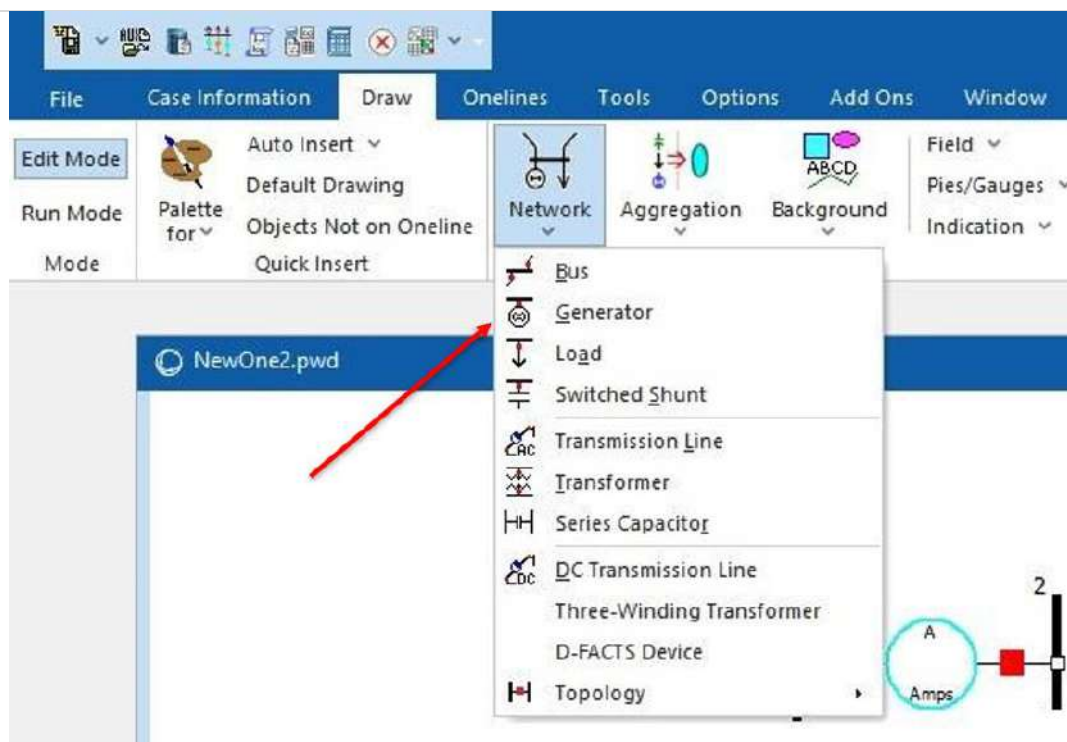
18. INSERÇÃO DOS GERADORES NAS BARRAS DO SISTEMA

Nesta etapa, devem ser inseridos os elementos de geração responsáveis pelo fornecimento de potência ao sistema elétrico. Para adicionar um gerador no diagrama unifilar, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Generator".

Após selecionar o elemento, posicione os geradores nas Barras 1 e 2, conforme a configuração proposta para o sistema analisado.

A Figura 18 apresenta o procedimento de inserção dos geradores no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Os geradores representam as fontes de potência ativa e reativa do sistema, sendo elementos fundamentais para a análise do fluxo de potência.

Figura 18 – Inserção dos geradores no sistema elétrico utilizando o PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

19. CONFIGURAÇÃO DO GERADOR NA BARRA 1

Após inserir o gerador no sistema, clique sobre a Barra 1 para abrir a janela de configuração do elemento de geração. No campo "MV Setpoint", informe o valor 0 e, em seguida, clique em "OK" para confirmar a configuração.

Essa definição estabelece o valor inicial de geração ativa associado ao gerador conectado à Barra 1, conforme os parâmetros propostos para a simulação.

A Figura 19 apresenta a janela de configuração do gerador associado à Barra 1 no PowerWorld Simulator. O campo "MW Setpoint" (potência ativa de referência do gerador) é configurado com valor igual a 0 MW, conforme definido para o modelo analisado.

Figura 19 – Configuração do gerador conectado à Barra 1

Generator Options

Bus Number: 1 | Find By Number | Find ... | Status: ☐ Open ☒ Closed | Generator MVA Base: 100,00

ID: 1 | Find By Name | Fuel Type: UN (Unknown) | [PW=0] [EPC=0] | Unit Type: [v]

Bus Name: 1 | Labels ...

Area Name: 1

Display Information | **Power and Voltage Control** | Costs | Fault Parameters | Owners, Area, etc | Custom

Power Control

MW Setpoint: [d] | MW Output: 0,000 | Part. Factor: 10,00

Min. MW Output: 0,000 | ☒ Available for AGC

Max. MW Output: 1000,000 | ☒ Enforce MW Limits during automatic control

Voltage Control

Mvar Output: 0,000 | ☒ Available for AVR | Regulated Bus Number: 1

Min Mvars: -9900,000 | ☐ Use Capability Curve | SetPoint Voltage: 1,000000

Max Mvars: 9900,000 | SetPoint Voltage Tol: 0,000000

Mvar Capability Curve

	MW	Min Mvar	Max Mvar
1			
2			
3			
4			
5			

Remote RegFactor: 100,0

Line Drop Compensation

Use LDC: No [v] | Xcomp: 0,000100 | Rcomp: 0,000000

Wind Control Mode

Mode: None [v] | Power Factor: 1,0000 [d]

Voltage Droop Control

Name: [] | Find... | Clear | Add...

OK | Save | Save to Aux | Cancel | Help

Fonte: Autor

20. AJUSTE DA ORIENTAÇÃO DO GERADOR

Caso seja necessário alterar a posição ou orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar, clique duas vezes sobre o elemento de geração para acessar suas propriedades gráficas.

Realize o ajuste do campo de orientação conforme a disposição desejada no modelo do sistema e confirme a alteração.

A Figura 20 apresenta a janela de configuração utilizada para ajustar a orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar. Essa alteração tem finalidade visual, permitindo organizar a representação gráfica do sistema elétrico de forma adequada.

Figura 20 – Ajuste da orientação gráfica do gerador no PowerWorld Simulator

Fonte: Autor

21. CONEXÃO DOS GERADORES ÀS BARRAS DO SISTEMA

Após configurar os geradores, realize a conexão dos elementos de geração às respectivas barras do sistema elétrico. Conecte o gerador à Barra 1 e repita o mesmo procedimento para a Barra 2, garantindo que os elementos estejam corretamente integrados ao modelo da rede.

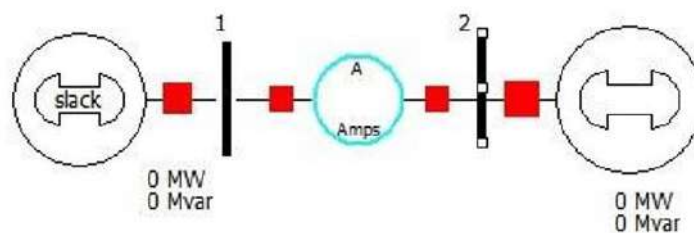
22. VERIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO

Após a inserção, configuração e conexão dos geradores às barras do sistema, verifique se a representação do modelo está conforme a configuração apresentada na Figura 21.

Essa etapa permite confirmar se os elementos de geração estão corretamente posicionados e conectados ao sistema elétrico antes da execução do fluxo de potência.

A Figura 21 apresenta a configuração final dos elementos de geração no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Observa-se a conexão dos geradores às respectivas barras do sistema, conforme os parâmetros definidos nas etapas anteriores da modelagem.

Figura 21 – Configuração final dos geradores conectados às barras do sistema



Fonte: Autor

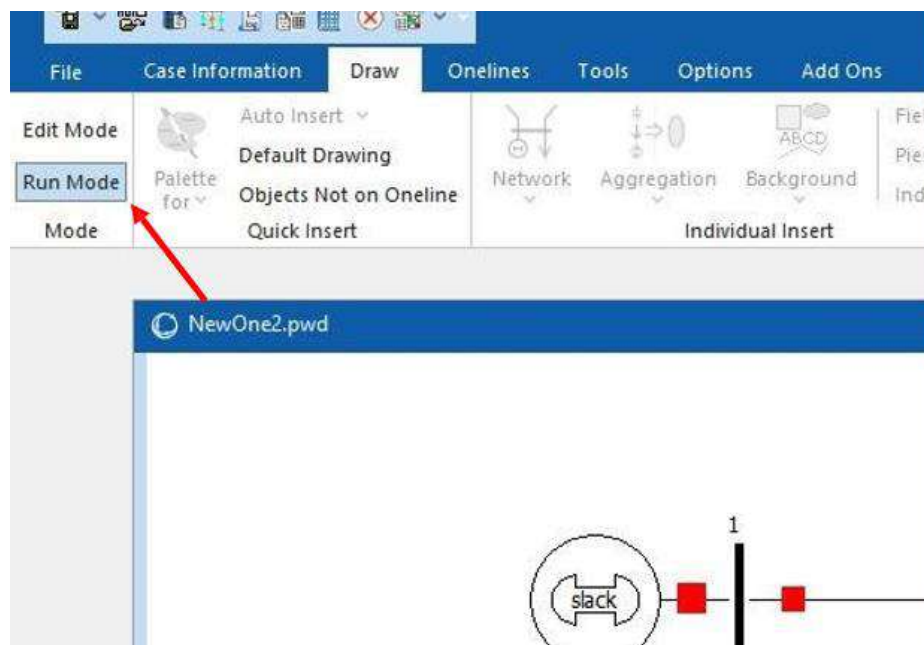
23. EXECUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após concluir a montagem e configuração do sistema elétrico, deve-se executar o cálculo do fluxo de potência. Para iniciar a simulação, altere o ambiente do PowerWorld Simulator para o modo de execução ("Run Mode").

Essa etapa permite que o software realize os cálculos elétricos da rede, determinando os fluxos de potência e as condições operacionais do sistema modelado.

A Figura 22 apresenta a seleção do modo "Run Mode" no PowerWorld Simulator, utilizado para executar a simulação do sistema elétrico após a etapa de modelagem. Nesse modo, o software realiza os cálculos do fluxo de potência e permite a análise dos resultados obtidos.

Figura 22 – Seleção do modo Run Mode no PowerWorld Simulator



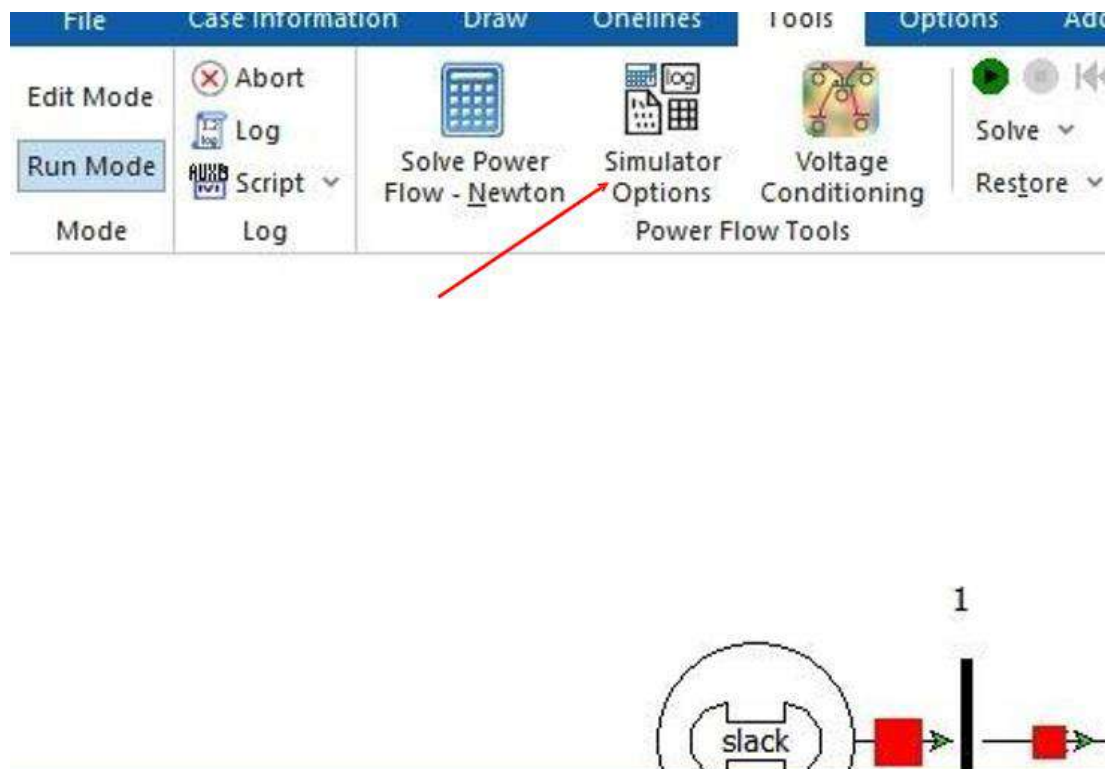
Fonte: Autor

24. ACESSO ÀS OPÇÕES DO SIMULADOR

Para configurar os parâmetros necessários à execução do fluxo de potência, acesse novamente o menu "Simulator Options" do PowerWorld Simulator.

A Figura 23 apresenta o acesso ao menu "Simulator Options" durante a etapa de execução do fluxo de potência. Essa opção permite realizar ajustes adicionais nos parâmetros do simulador antes da obtenção dos resultados da análise do sistema elétrico.

Figura 23 – Acesso ao menu Simulator Options durante a execução da simulação



Fonte: Autor

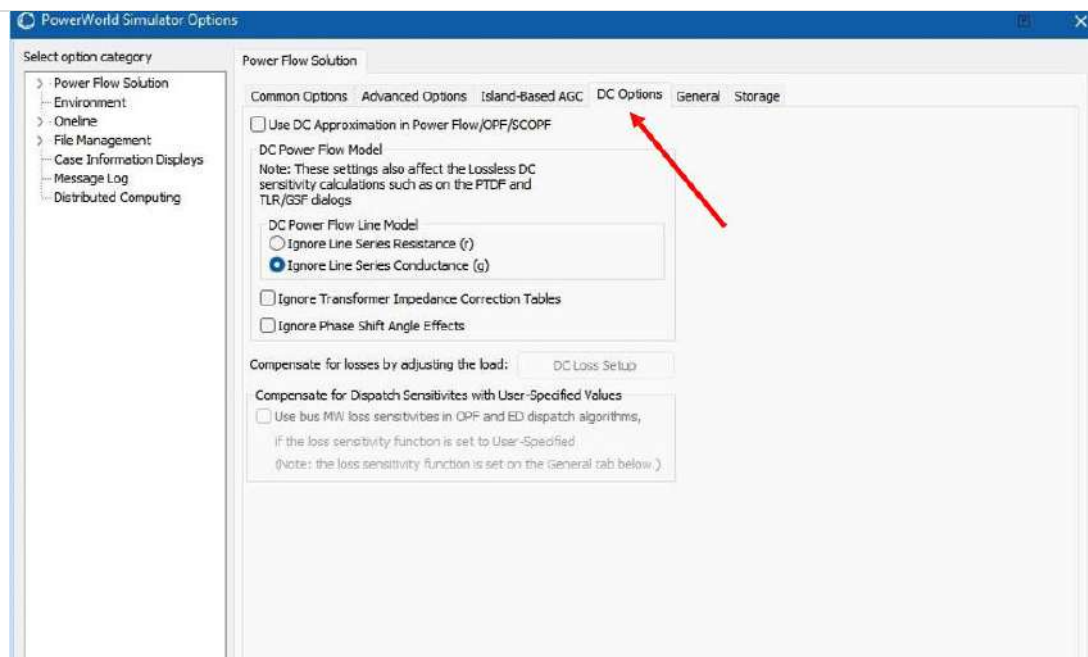
25. CONFIGURAÇÃO DAS OPÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA CC

Após acessar o menu "Simulator Options", será aberta uma janela de configuração do simulador. Selecione a opção "DC Options" e ajuste os parâmetros conforme apresentados na Figura 24.

Essa configuração define as opções utilizadas pelo PowerWorld Simulator para realizar o cálculo do fluxo de potência linearizado (Fluxo CC), considerando as características específicas do modelo de análise.

A Figura 24 apresenta a janela "DC Options" do PowerWorld Simulator, utilizada para configurar os parâmetros do método de fluxo de potência linearizado. Essa etapa prepara o simulador para realizar os cálculos de potência ativa e análise do comportamento do sistema elétrico utilizando o modelo CC.

Figura 24 – Configuração das opções do Fluxo de Potência CC no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

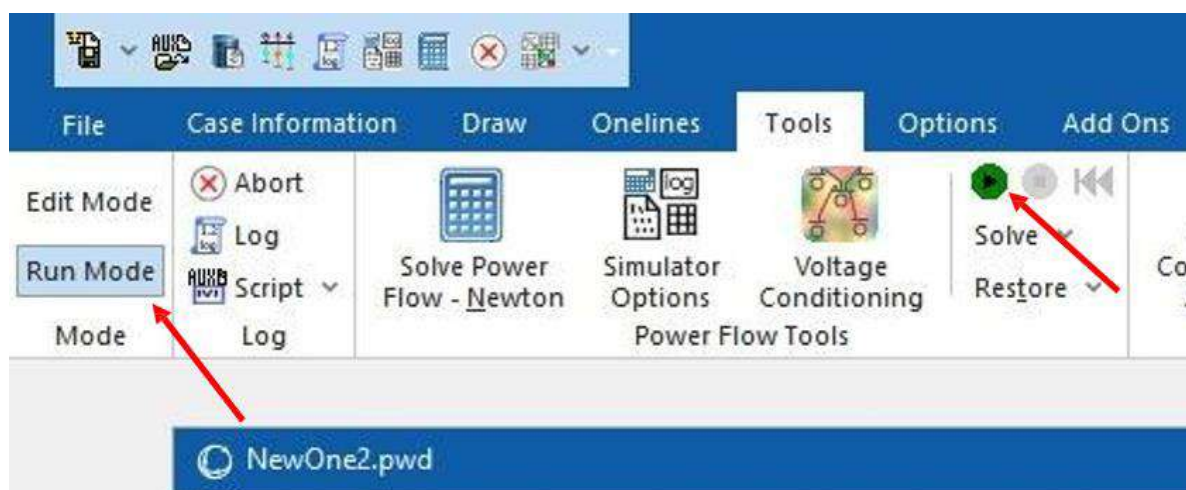
26. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após configurar os parâmetros do fluxo de potência linearizado, execute a simulação no PowerWorld Simulator. Para isso, acesse o menu "Tools" e selecione a opção "Play" (botão verde), iniciando o processamento dos cálculos pelo simulador.

Essa etapa permite que o software execute a solução do fluxo de potência e apresente os resultados operacionais do sistema elétrico modelado.

A Figura 25 apresenta o comando "Play" localizado no menu "Tools" do PowerWorld Simulator, utilizado para iniciar a execução da simulação. Após esse comando, o software realiza os cálculos do fluxo de potência conforme as configurações definidas anteriormente.

Figura 25 – Execução da simulação utilizando o comando Play no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

27. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após a execução da simulação, é possível consultar as grandezas elétricas calculadas pelo PowerWorld Simulator. Para obter os valores de potência e demais variáveis do sistema, clique sobre o elemento de interesse.

As informações de fluxo de potência podem ser obtidas selecionando as linhas de transmissão, enquanto os valores de tensão e ângulo das barras podem ser verificados diretamente nos elementos de barra do sistema.

A Figura 26 apresenta a consulta dos resultados obtidos após a solução do fluxo de potência. O PowerWorld Simulator permite visualizar as grandezas elétricas associadas aos elementos da rede, como fluxos de potência nas linhas de transmissão e valores de tensão nas barras do sistema.

Figura 26 – Visualização das variáveis elétricas no PowerWorld Simulator

Bus Information for Present

Bus Number: 2
Bus Name: 2
Nom. Voltage: 138,000
Labels ...: no labels

Area: 1
Zone: 1
Substation:
Owner: 1

Voltage (p.u.): 1,000000
Angle (deg): -5,730
Data Maintainer:
Voltage (kV): 138,000
Angle (rad): -0,10000

Find By Number
Find By Name
Find ...

Status
☐ Disconnected
☒ Connected

View Island Dialog
View Area Dialog
View Zone Dialog
View Substation Dialog
View Owner Dialog

☐ Slack Bus

Device Info Limits OPF Geography Custom GIC Branches Stability

Generator Information
Total MW: 0,0
Total Mvar: 0,0
View/Edit Generators

Switched Shunt Information
Actual Nominal
G (MW)
B (Mvar)
View/Edit Switched Shunts

Load Information
Current MW: 100,0
Current Mvar: 0,0
View/Edit Bus Loads

Bus Shunt Admittance
Actual Nominal
G (MW)
B (Mvar)

Bus Voltage Regulation
Desired PU Voltage: 1,0000
Bus Voltage Regulator Devices
Regulated by :
Generator: 2 (2_138,0) #1

Fonte: Autor

28. REGISTRO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA NA LINHA

Após a execução do fluxo de potência, registre o valor da potência transmitida pela linha de transmissão obtido diretamente no PowerWorld Simulator. Esse valor será utilizado

posteriormente para comparação com o resultado calculado pelo modelo teórico do fluxo de potência linearizado.

29. CÁLCULO TEÓRICO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA

Com base nos parâmetros elétricos da linha de transmissão e nos valores de tensão e ângulo das barras, realize o cálculo teórico da potência transmitida utilizando as equações do modelo de fluxo de potência linearizado (Fluxo CC).

Compare o valor obtido pelo cálculo matemático com o resultado apresentado pelo simulador, verificando a coerência entre a modelagem computacional e a fundamentação teórica.

Avaliando os resultados:

Ao finalizar a atividade, o estudante deverá apresentar os resultados obtidos durante a modelagem e análise do sistema elétrico, contemplando:

- ✓ Sistema elétrico modelado no PowerWorld Simulator;
- ✓ Valor da potência transmitida pela linha de transmissão obtido por meio da simulação computacional;
- ✓ Valor da potência transmitida pela linha de transmissão calculado por meio da formulação teórica do Fluxo de Potência Linearizado (Fluxo CC).

Checklist:

- ✓ Software PowerWorld Simulator aberto e novo caso de estudo criado;
- ✓ Parâmetros iniciais do simulador configurados, incluindo base de potência e sistema de unidades;
- ✓ Ambiente de simulação e opções de visualização do diagrama unifilar configurados;
- ✓ Sistema elétrico modelado no software, com inserção das barras, linha de transmissão e elementos de geração;
- ✓ Barra de referência (Slack Bus) configurada corretamente;
- ✓ Parâmetros elétricos dos elementos da rede definidos conforme o modelo proposto;
- ✓ Fluxo de potência linearizado (Fluxo CC) configurado e executado no PowerWorld Simulator;
- ✓ Resultados da simulação obtidos, incluindo potência transmitida pela linha de transmissão;
- ✓ Potência transmitida pela linha calculada teoricamente utilizando o modelo do Fluxo CC;
- ✓ Resultados da simulação comparados com os valores obtidos pela formulação teórica.

RESULTADOS

Resultados do experimento:

Ao final desta aula prática, você deverá entregar um relatório (em Word).

O relatório deverá conter:

- ✓ Objetivo da prática.
- ✓ Descrição do sistema elétrico modelado no PowerWorld Simulator.
- ✓ Configuração dos parâmetros das barras, linha de transmissão e elementos de geração.
- ✓ Representação do sistema elétrico desenvolvido no software.
- ✓ Resultado do fluxo de potência linearizado (Fluxo CC) obtido por simulação.
- ✓ Cálculo teórico da potência transmitida pela linha de transmissão.
- ✓ Comparação entre os resultados obtidos pela simulação e pela teoria.
- ✓ Discussão dos resultados.
- ✓ Conclusão da atividade.

Resultados de Aprendizagem:

Ao final desta prática, o estudante será capaz de compreender os fundamentos do fluxo de potência linearizado (Fluxo CC) aplicado à modelagem e análise de sistemas elétricos de potência. Além disso, será capaz de representar um sistema elétrico básico no ambiente computacional, configurar os parâmetros das barras, linhas de transmissão e elementos de geração, bem como executar a simulação do fluxo de potência utilizando o PowerWorld Simulator. O estudante também desenvolverá habilidades na interpretação dos resultados obtidos pela simulação, analisando os valores de potência transmitida pela rede e relacionando-os com os conceitos matemáticos do modelo linearizado. Espera-se ainda que o estudante realize os procedimentos de modelagem e análise de forma organizada e criteriosa, verificando a correta configuração do sistema, a consistência dos resultados computacionais e a comparação entre os valores obtidos pelo software e os cálculos teóricos, desenvolvendo autonomia e rigor técnico na resolução de problemas relacionados aos sistemas elétricos de potência.

ROTEIRO DE AULA PRÁTICA

SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA AVANÇADOS

Unidade: Unidade 1 – Modelagem do Fluxo de Carga.

Aula: Aula 4 - Implementação Computacional para Resolução de Fluxo de Carga.

OBJETIVOS

Definição dos objetivos da aula prática:

- Montar o sistema elétrico de potência no PowerWorld Simulator a partir dos parâmetros fornecidos;
- Realizar a simulação do fluxo de carga para obtenção das grandezas elétricas do sistema;
- Calcular e interpretar o perfil de tensão das barras utilizando os resultados obtidos na simulação;
- Relacionar a resolução computacional do fluxo de carga com a análise operacional de sistemas elétricos de potência.

SOLUÇÃO DIGITAL:

PowerWorld Simulator (Software Livre/Educacional)

O PowerWorld Simulator é um software computacional interativo desenvolvido para a modelagem, simulação e análise de sistemas elétricos de potência, especialmente redes de alta tensão. A ferramenta permite representar graficamente os elementos que compõem um sistema elétrico, como barras, linhas de transmissão, transformadores, geradores e cargas, possibilitando a avaliação do comportamento operacional da rede.

O software é utilizado em estudos de fluxo de carga, análise de estabilidade, curto-circuito, contingências operacionais e demais aplicações relacionadas ao planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. Por meio de sua interface gráfica, permite acompanhar as condições de operação da rede em diferentes cenários, considerando variações de geração, demanda e configuração do sistema.

No contexto desta atividade, o PowerWorld Simulator será utilizado como ferramenta de apoio para a modelagem e análise do fluxo de carga, permitindo a visualização dos resultados obtidos e a interpretação do comportamento das grandezas elétricas do sistema estudado.

PROCEDIMENTOS PRÁTICOS E APLICAÇÕES

Procedimento/Atividade nº 1

Cálculo do Fluxo de Potência e Análise do Perfil de Tensão.

Atividade proposta:

Aplicar os conhecimentos de Sistemas Elétricos de Potência Avançados para modelar um sistema elétrico no PowerWorld Simulator, realizar a resolução do fluxo de carga e analisar o perfil de tensão das barras do sistema.

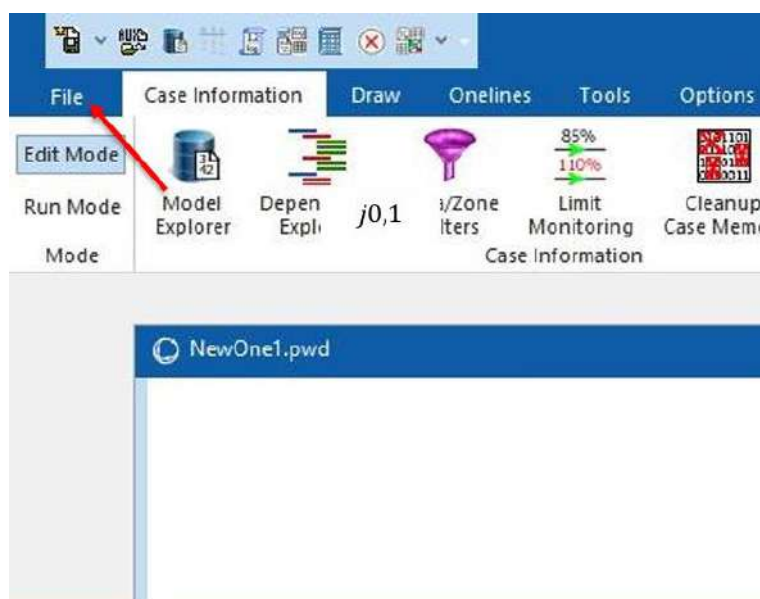
Procedimentos para a realização da atividade:

1. INÍCIO DO PROJETO:

Abra o software PowerWorld Simulator para iniciar a modelagem do sistema elétrico. Na barra de ferramentas superior, selecione a opção "File" para acessar as opções de criação ou abertura de um projeto.

A Figura 1 demonstra o acesso ao menu "File" do PowerWorld Simulator, utilizado para iniciar um novo caso de estudo ou carregar uma configuração existente. A partir dessa opção, o usuário poderá criar o modelo do sistema elétrico, inserindo posteriormente os elementos da rede, como barras, geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 1 – Tela inicial do PowerWorld Simulator para criação de um novo projeto



Fonte: Autor

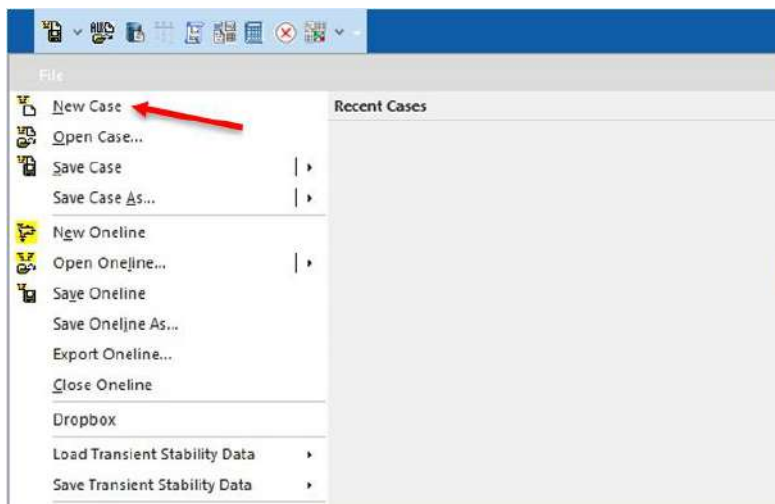
2. CONFIGURAÇÃO DA BASE:

Acesse o menu "File" e selecione a opção "New Case" para iniciar a criação de uma nova base de dados no PowerWorld Simulator. Ao executar esse comando, será aberta uma nova janela destinada à configuração inicial do caso de estudo, onde serão definidos os parâmetros básicos do sistema elétrico a ser modelado.

A Figura 2 apresenta o menu "File" do PowerWorld Simulator com a opção "New Case" selecionada. Essa função permite criar uma nova base de simulação, iniciando o processo de

modelagem do sistema elétrico de potência que será utilizado no estudo do fluxo de potência linearizado.

Figura 2 – Seleção da opção New Case para criação de uma nova base de estudo no PowerWorld Simulator



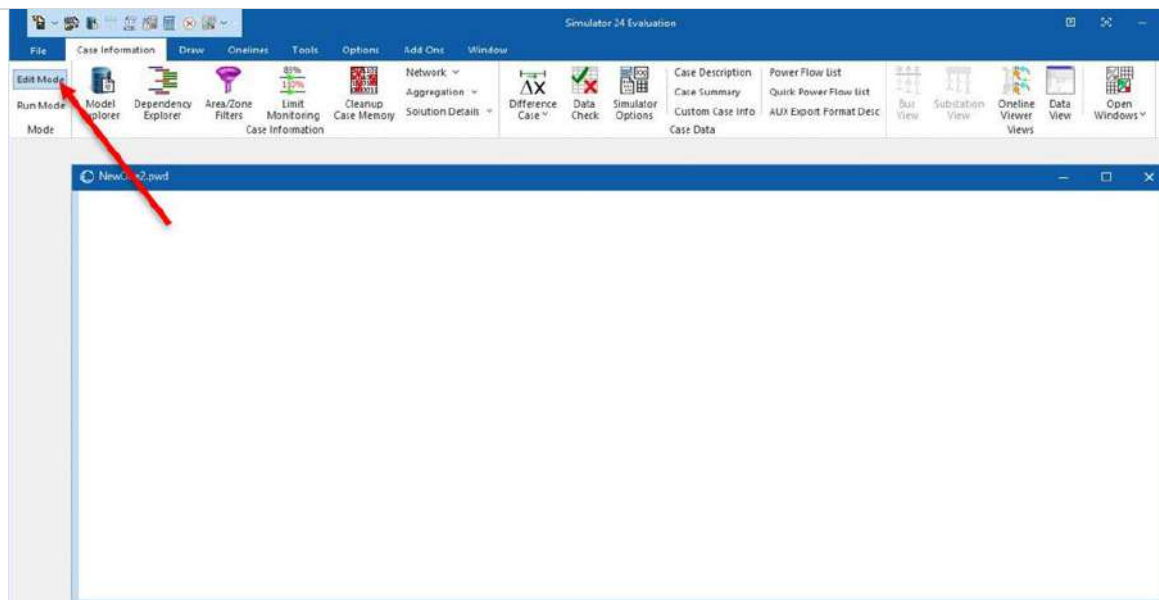
Fonte: Autor

3. CRIAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO:

Após a criação de um novo caso de estudo, será apresentada uma tela em branco no modo Edit Mode, ambiente destinado à construção e configuração do modelo do sistema elétrico. Nessa área serão inseridos os elementos da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, conforme as características do sistema a ser analisado.

A Figura X apresenta o ambiente de edição (Edit Mode) do PowerWorld Simulator após a criação de um novo caso. Essa área permite a inserção dos componentes elétricos e a montagem gráfica do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência linearizado.

Figura 3 – Área de edição para criação do modelo do sistema elétrico no PowerWorld Simulator



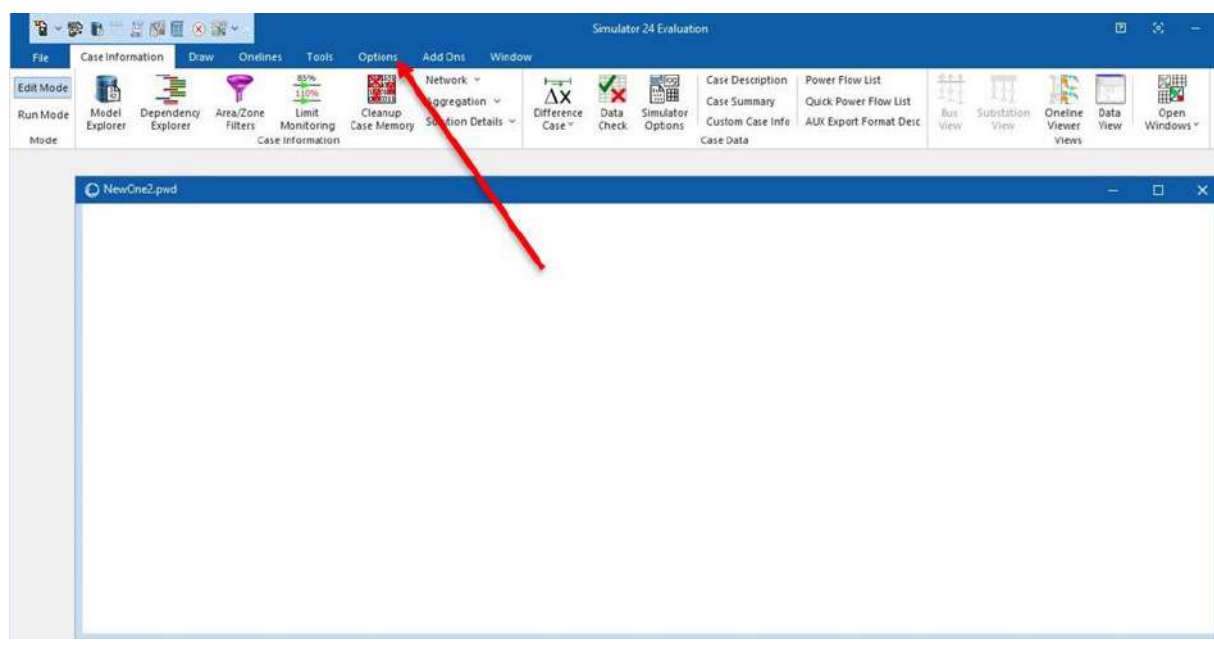
Fonte: Autor

4. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Nesta etapa, deve-se definir a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico em por unidade (pu). Para realizar essa configuração, acesse o menu "Options" do PowerWorld Simulator e ajuste os parâmetros necessários conforme as características do sistema analisado.

A Figura 4 apresenta o menu "Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para acessar as configurações gerais da simulação. Nesta etapa, será definida a base de potência do sistema em valores por unidade (pu), parâmetro fundamental para a padronização dos cálculos elétricos.

Figura 4 – Acesso às configurações de base de potência no PowerWorld Simulator

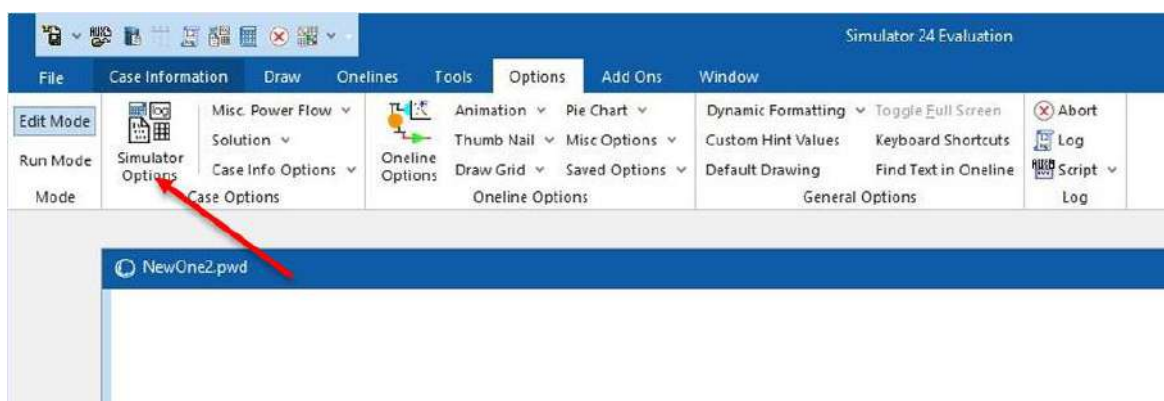


5. CONFIGURAÇÃO DAS OPÇÕES DO SIMULADOR:

Nesta etapa, acesse o menu "Simulator Options" do PowerWorld Simulator para abrir a janela de configurações do ambiente de simulação. Essas opções permitem ajustar parâmetros gerais utilizados na modelagem e execução dos estudos de fluxo de potência.

A Figura 5 apresenta o menu de acesso às opções de configuração do simulador (Simulator Options) no PowerWorld Simulator. Essa janela permite definir parâmetros gerais da simulação, que serão utilizados durante a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 5 – Acesso ao menu Simulator Options do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

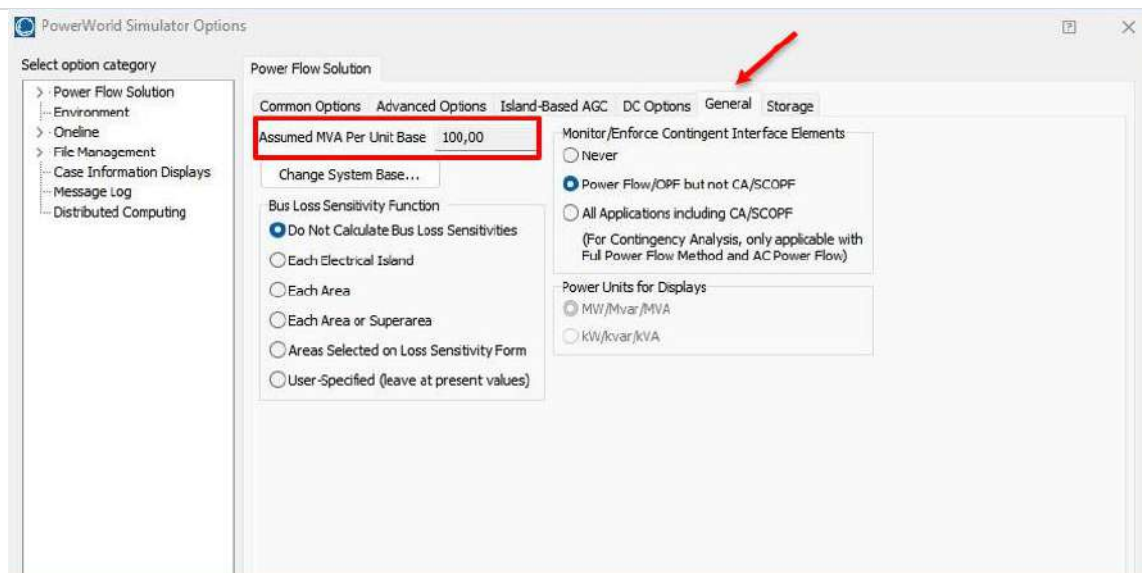
6. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Ao acessar o menu "Simulator Options", uma nova janela será aberta. Selecione a aba "General" e localize o campo "Assumed MVA Per Unit Base".

Nesse campo, informe o valor de 100,00 MVA, que será utilizado como base de potência do sistema para os cálculos realizados pelo simulador em valores por unidade (pu).

A Figura 6 apresenta a janela de configuração Simulator Options, na aba General, destacando o campo "Assumed MVA Per Unit Base", onde é definida a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico. O valor de 100 MVA é uma referência usual em estudos de sistemas de potência e será empregado nos cálculos do fluxo de potência linearizado.

Figura 6 – Configuração da base de potência no PowerWorld Simulator

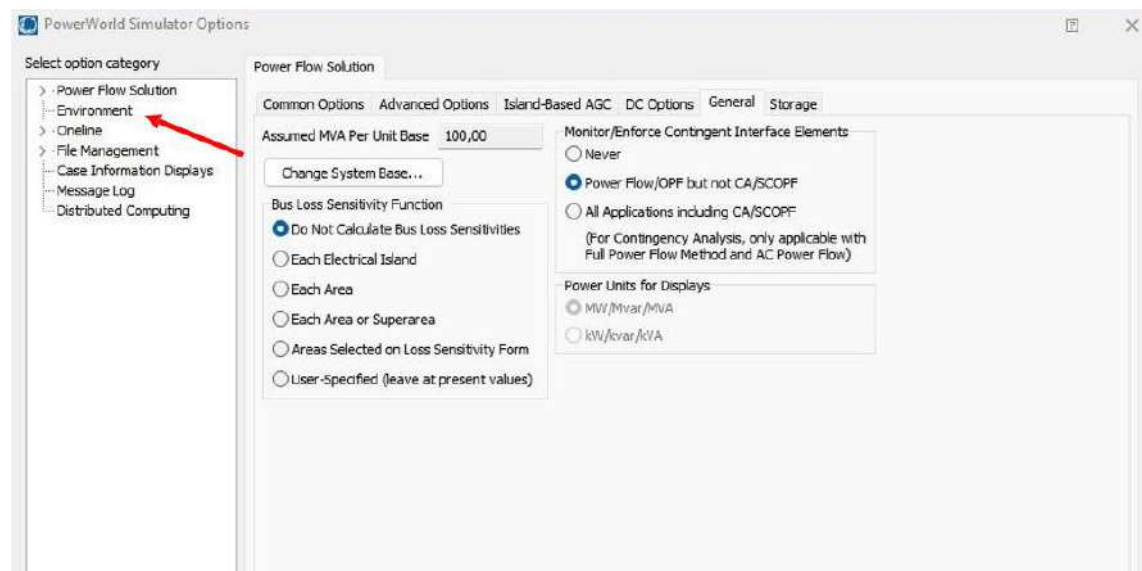


Fonte: Autor

7. CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Na mesma janela de configurações do Simulator Options, selecione a opção "Environment" para acessar os parâmetros relacionados ao ambiente de simulação do PowerWorld Simulator. A Figura 7 apresenta a janela Simulator Options com a seleção da aba "Environment", utilizada para configurar parâmetros relacionados ao ambiente de execução da simulação. Essas configurações complementam a preparação do software para a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 7 – Acesso às configurações de ambiente do PowerWorld Simulator



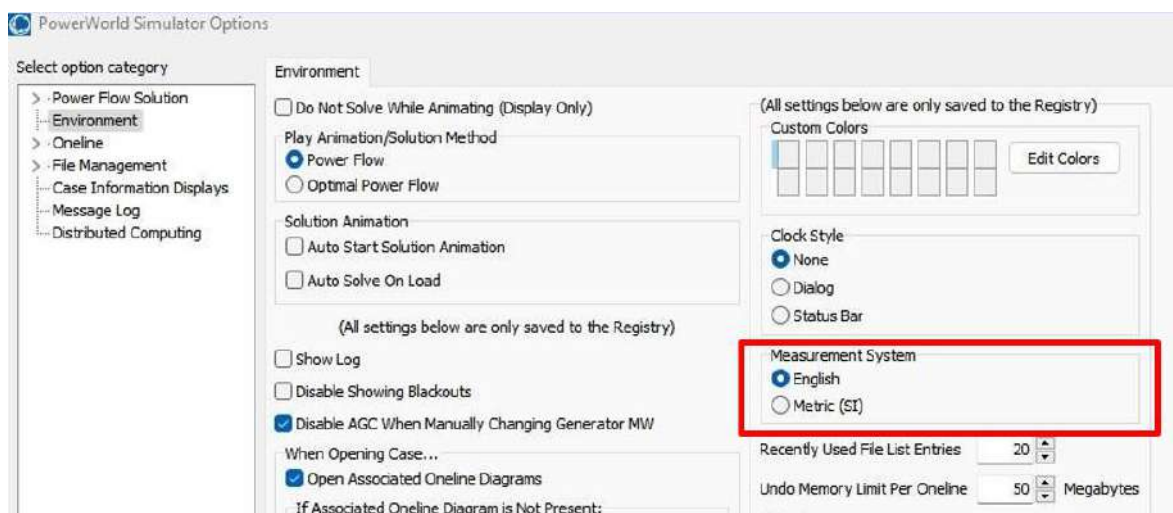
Fonte: Autor

8. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADES

Na aba "Environment", selecione a opção "Metric (SI)" para configurar o sistema de unidades utilizado pelo software. Após realizar a seleção, clique em "OK" para confirmar as alterações e aplicar as configurações definidas.

A Figura 8 apresenta a configuração do sistema de unidades na aba "Environment" do PowerWorld Simulator. A opção "Metric (SI)" define a utilização do Sistema Internacional de Unidades, padronizando a representação das grandezas elétricas e físicas utilizadas durante a modelagem e análise do sistema.

Figura 8 – Seleção do sistema de unidades Metric (SI) no PowerWorld Simulator



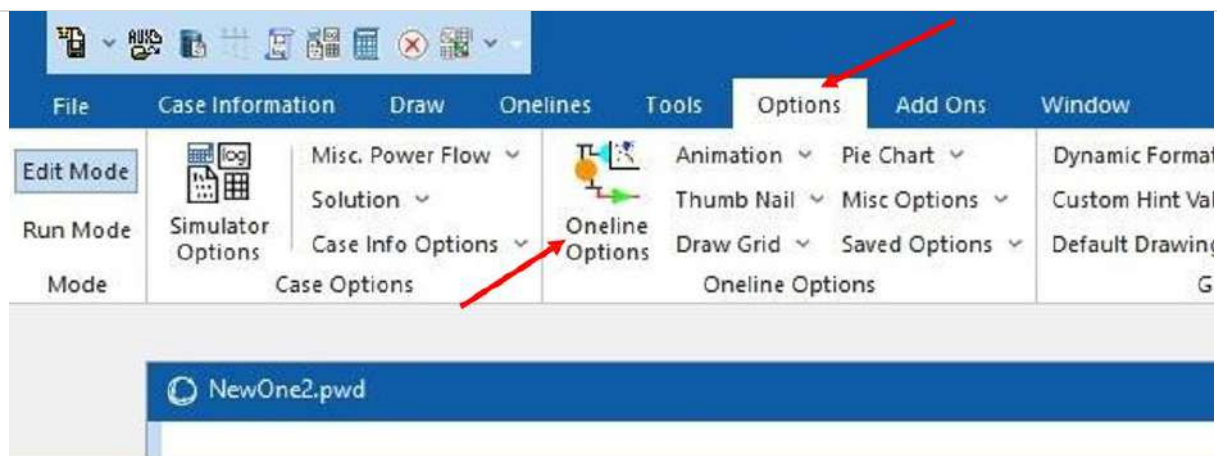
Fonte: Autor

9. CONFIGURAÇÃO DO DIAGRAMA UNIFILAR

Clique novamente no menu "Options" e, em seguida, selecione a opção "Online Options" para acessar as configurações de visualização do diagrama unifilar do sistema elétrico.

A Figura 9 apresenta o acesso ao menu "Online Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para configurar a forma de representação gráfica do sistema elétrico no diagrama unifilar. Essas opções permitem ajustar aspectos de visualização dos elementos da rede durante a montagem e análise do fluxo de potência.

Figura 9 – Acesso às configurações do diagrama unifilar no PowerWorld Simulator



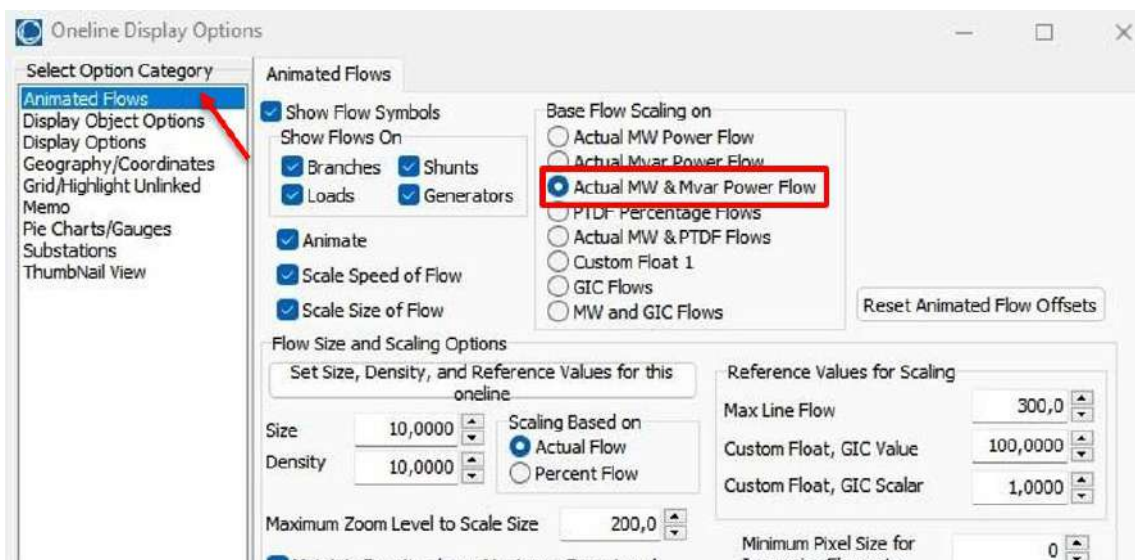
Fonte: Autor

10. CONFIGURAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO DOS FLUXOS DE POTÊNCIA

Na janela "Online Options", selecione a opção "Animated Flows" para habilitar a visualização dinâmica dos fluxos no diagrama unifilar. Em seguida, marque as opções "Actual MW" e "Mvar Power Flow", permitindo a exibição dos fluxos de potência ativa e reativa no sistema. Após realizar as configurações desejadas, clique em "Apply" para aplicar as alterações e, posteriormente, em "OK" para confirmar as configurações.

A Figura 10 apresenta a janela "Online Options", na qual são configuradas as opções de visualização dos fluxos de potência no diagrama unifilar. A seleção de "Animated Flows", "Actual MW" e "Mvar Power Flow" permite acompanhar graficamente a transferência de potência ativa e reativa entre os elementos do sistema elétrico.

Figura 10 – Configuração da visualização dos fluxos de potência no PowerWorld Simulator



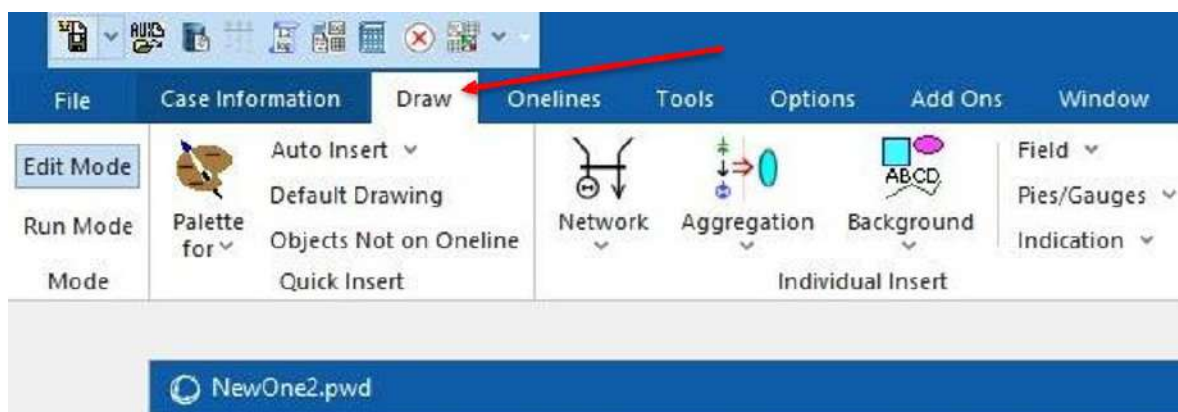
Fonte: Autor

11. MONTAGEM DO DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA

Nesta etapa, inicia-se a representação gráfica do sistema elétrico a ser simulado. Para isso, acesse o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, que disponibiliza as ferramentas necessárias para inserção e organização dos elementos da rede elétrica.

A Figura 11 apresenta o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, utilizado para realizar a montagem gráfica do sistema elétrico. Por meio dessas ferramentas, é possível inserir os componentes da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, formando o diagrama unifilar utilizado na simulação.

Figura 11 – Acesso às ferramentas de desenho do sistema no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

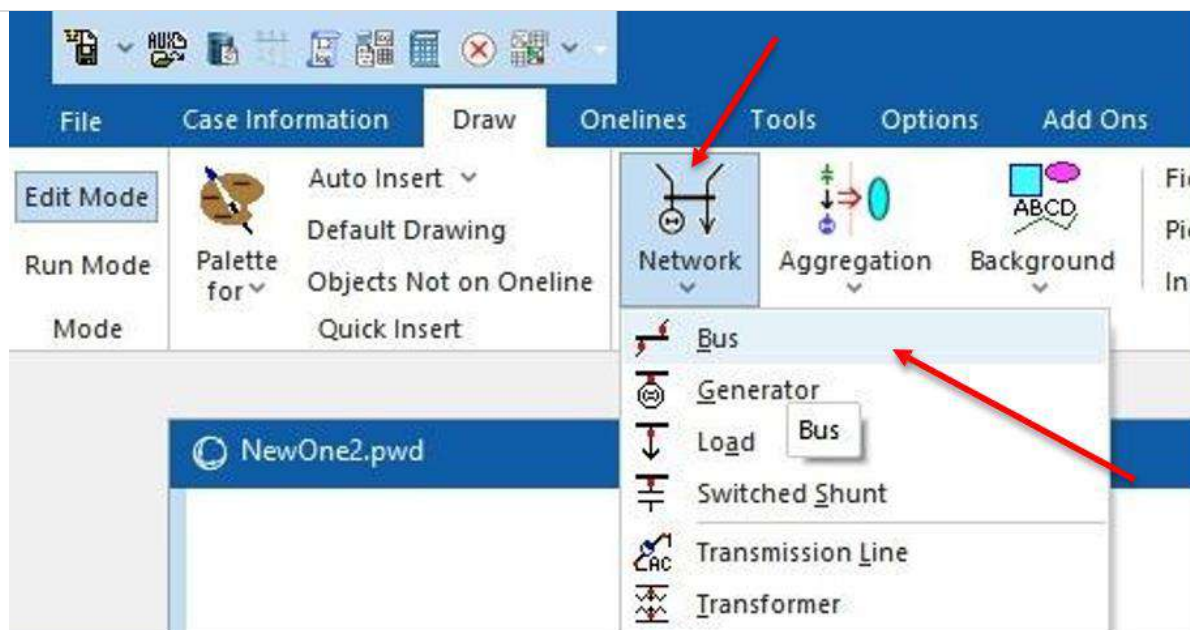
12. INSERÇÃO DA BARRA DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesta etapa, inicia-se a construção do sistema elétrico por meio da inserção das barras que representam os nós da rede. Para adicionar uma barra ao diagrama unifilar, acesse o menu "Network" e selecione a opção "Bus".

Após a seleção, a barra poderá ser posicionada no ambiente de edição do PowerWorld Simulator, dando início à montagem do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência.

A Figura 12 apresenta o procedimento de inserção de uma barra (Bus) no ambiente de modelagem do PowerWorld Simulator. As barras representam os pontos de conexão do sistema elétrico, onde são associados elementos como geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 12 – Inserção de uma barra no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

13. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA BARRA

Após inserir a barra no diagrama unifilar, clique sobre a área de edição para abrir a janela de configuração do elemento. Nesta etapa, devem ser definidos os parâmetros elétricos da barra conforme as características do sistema analisado.

Configure a tensão nominal da barra para 138 kV e ajuste os demais campos conforme os valores apresentados na tela de parâmetros.

A Figura 13 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de uma barra no PowerWorld Simulator. Nessa etapa são definidos dados elétricos importantes, como a tensão nominal do barramento, que neste estudo será considerada igual a 138 kV, além de outros parâmetros necessários para a modelagem do sistema elétrico.

Figura 13 – Janela de configuração dos parâmetros da barra no PowerWorld Simulator

Bus Options

Bus Number: 1
 Bus Name: 1
 Nominal Voltage: 138,0000 kV
 Labels ...: no labels

Find By Number
 Find By Name
 Find ...

	Number	Name
Area	1	1
Balancing Authority	1	1
Zone	1	1
Owner	1	1
Substation		
Data Maintainer		

View Area Dialog
 View Zone Dialog
 View Owner Dialog
 View Substation Dialog

Bus Information | Limits | Display | Attached Devices | Geography | Custom | Stability

Orientation:
☐ Right
☒ Up
☐ Left
☐ Down

Shape:
☒ Rectangle
☐ Ellipse

Size: 5,00
 Width: 0,300
☐ Scale Width with Size

Link to New Bus

☐ Allow to Act as a Fixed Number Bus (impacts auto insertion routines)

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

14. CONFIGURAÇÃO DA BARRA DE REFERÊNCIA (SLACK BUS)

Na janela de configuração da barra, acesse a opção "Bus Information" para realizar a definição do tipo de barra no sistema elétrico. Selecione a caixa "System Slack Bus" e confirme a alteração clicando em "OK".

A barra configurada como Slack Bus será utilizada como referência angular do sistema, sendo responsável pelo balanço entre a geração e o consumo de potência durante a solução do fluxo de potência.

A Figura 14 apresenta a janela "Bus Information", destacando a opção "System Slack Bus", utilizada para definir a barra de referência do sistema elétrico. Essa configuração estabelece a barra responsável por fornecer a referência de ângulo de tensão e pelo ajuste do balanço de potência durante os cálculos do fluxo de carga.

Figura 14 – Configuração da barra de referência (System Slack Bus) no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number 1 Find By Number

Bus Name 1 Find By Name

Nominal Voltage 138,00 kV Find ...

Labels ...

	Number	Name	
Area	Change 1	1	View Area Dialog
Balancing Authority	Change 1	1	View Zone Dialog
Zone	Change 1	1	View Owner Dialog
Owner	Change 1		View Substation Dialog
Substation	Change		
Data Maintainer	Change		

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.) 1,00

Angle (degrees) 0,00

Bus Voltage Regulator Devices

☒ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

15. INSERÇÃO DAS DEMAIS BARRAS DO SISTEMA

Após a criação da barra de referência, devem ser inseridas as demais barras que irão compor o sistema elétrico analisado. Crie as Barras 2, 3 e 4, todas com tensão nominal de 138 kV.

Durante a configuração dessas barras, não selecione a opção "System Slack Bus", pois somente a barra de referência definida anteriormente deve exercer essa função no sistema. Após realizar as configurações, clique em "OK" para confirmar a inserção dos elementos.

Figura 15 – Configuração das demais barras do sistema no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number 1 Find By Number

Bus Name 1 Find By Name

Nominal Voltage 138,00 kV Find ...

Labels ...

	Number	Name	
Area	Change 1	1	View Area Dialog
Balancing Authority	Change 1	1	
Zone	Change 1	1	View Zone Dialog
Owner	Change 1		View Owner Dialog
Substation	Change		View Substation Dialog
Data Maintainer	Change		

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.) 1,00

Angle (degrees) 0,00

Bus Voltage Regulator Devices

☐ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

Observação:

Apenas uma barra do sistema elétrico deve ser definida como System Slack Bus, sendo esta responsável pela referência angular do sistema e pelo balanço de potência ativa e reativa durante os estudos de fluxo de potência. As demais barras devem permanecer sem essa seleção, conforme configurado na Figura 15.

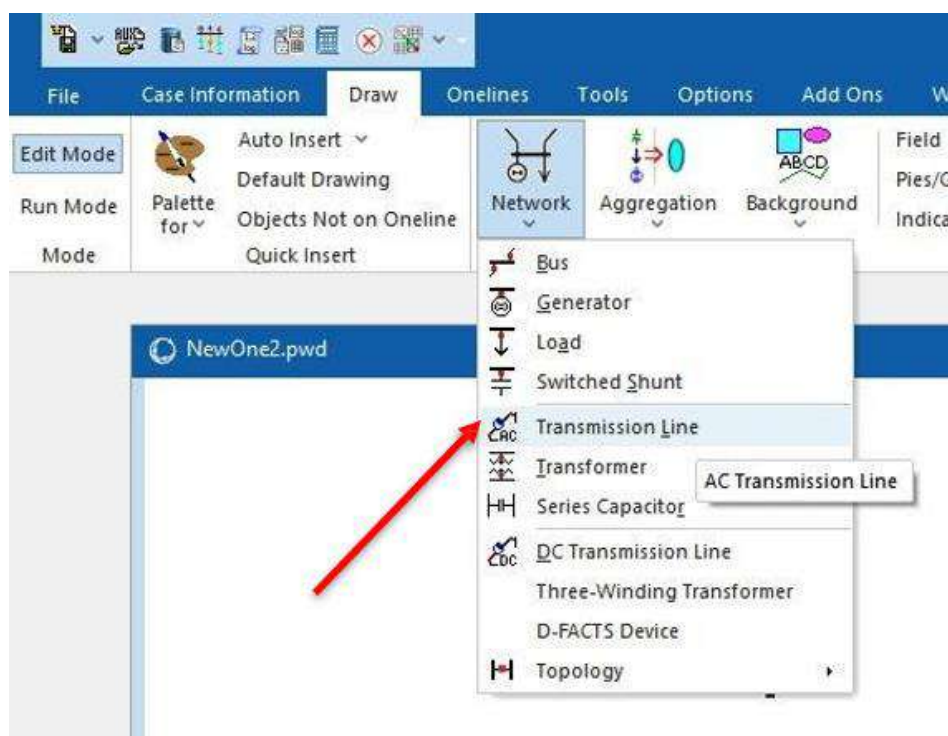
16. INSERÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Nesta etapa, deve-se realizar a interligação entre as barras do sistema elétrico por meio da inserção de uma linha de transmissão. Para isso, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Transmission Line".

Após selecionar o elemento, conecte a linha de transmissão entre as barras previamente criadas, estabelecendo a conexão necessária para a análise do fluxo de potência.

A Figura 16 apresenta o procedimento de inserção de uma linha de transmissão no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Esse elemento representa o ramo elétrico responsável pela conexão entre as barras do sistema, permitindo o fluxo de potência entre os nós da rede.

Figura 16 – Inserção da linha de transmissão entre as barras no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

17. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Após selecionar o elemento "Transmission Line", realize a conexão entre as barras do sistema conforme a sequência indicada na atividade. Inicialmente, clique sobre a Barra 1 e arraste até a Barra 2, realizando dois cliques para finalizar a inserção da linha de transmissão.

Ao concluir a ligação, será aberta uma janela de configuração dos parâmetros do elemento. Informe a resistência (R) da linha como 0,1 pu e a reatância (X) como 0,1 pu. Após inserir os valores, clique em "OK" para confirmar as configurações.

Repita o mesmo procedimento para inserir as demais linhas de transmissão do sistema, realizando as conexões entre as Barras 2 e 3 e entre as Barras 3 e 4, mantendo os mesmos valores de resistência e reatância para todos os elementos.

A Figura 17 apresenta a configuração da linha de transmissão inserida entre as barras do sistema. Nesta etapa são definidos os parâmetros elétricos dos elementos de transmissão, que serão utilizados pelo PowerWorld Simulator nos cálculos de fluxo de potência e na posterior montagem da matriz de admitância nodal (Y_{bus}).

Figura 17 – Configuração dos parâmetros elétricos da linha de transmissão

Branch Options

From Bus: 2 To Bus: 3 Circuit: 1

Number: 2 Name: 2 Area Name: 1 (1) Nominal kV: 138,0

Find By Numbers Find By Names Find ...

☒ From End Metered ☒ Default Owner (Same as From Bus)

Labels ...

Custom Parameters Stability Series Capacitor Fault Info Geography

Display Parameters Transformer Control Series Capacitor Fault Info Owner, Area, Zone, Sub

Status: ☐ Open ☒ Closed

Branch Device Type: Line

Allow Consolidation: ☒

Length: 0,00

Calculate Impedances >

Normal Status: ☐ Open ☒ Closed

Per Unit Impedance Parameters

Series Resistance (R)	0,1
Series Reactance (X)	0,1
Shunt Charging (B)	0,000000
Shunt Conductance (G)	0,000000

☐ Has Line Shunts Line Shunts

MVA Limits

Limit A	0.000
Limit B	0.000
Limit C	0.000
Limit D	0.000
Limit E	0.000
Limit F	0.000
Limit G	0.000
Limit H	0.000
Limit I	0.000
Limit J	0.000
Limit K	0.000

Convert Line to Transformer Exchange From and To Buses

D-FACTS Devices on the Line ☐ Has D-FACTS

OK Save Save to Aux Cancel Help

Fonte: Autor

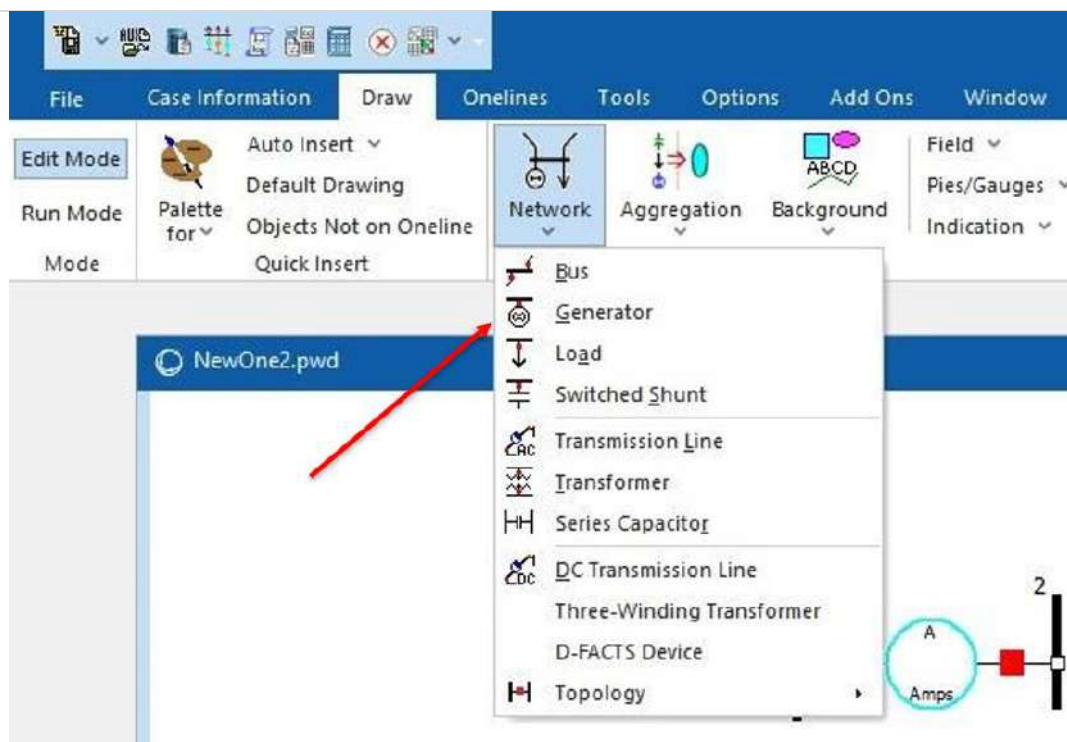
18. INSERÇÃO DOS GERADORES NAS BARRAS DO SISTEMA

Nesta etapa, devem ser inseridos os elementos de geração responsáveis pelo fornecimento de potência ao sistema elétrico. Para adicionar um gerador no diagrama unifilar, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Generator".

Após selecionar o elemento, posicione os geradores nas Barras 1 e 2, conforme a configuração proposta para o sistema analisado.

A Figura 18 apresenta o procedimento de inserção dos geradores no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Os geradores representam as fontes de potência ativa e reativa do sistema, sendo elementos fundamentais para a análise do fluxo de potência.

Figura 18 – Inserção dos geradores no sistema elétrico utilizando o PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

19. CONFIGURAÇÃO DO GERADOR NA BARRA 1

Após inserir o gerador no sistema, clique sobre a Barra 1 para abrir a janela de configuração do elemento de geração. No campo "MV Setpoint", informe o valor 0 e, em seguida, clique em "OK" para confirmar a configuração.

Essa definição estabelece o valor inicial de geração ativa associado ao gerador conectado à Barra 1, conforme os parâmetros propostos para a simulação.

A Figura 19 apresenta a janela de configuração do gerador associado à Barra 1 no PowerWorld Simulator. O campo "MW Setpoint" (potência ativa de referência do gerador) é configurado com valor igual a 0 MW, conforme definido para o modelo analisado.

Figura 19 – Configuração do gerador conectado à Barra 1

Generator Options

Bus Number: 1 | Find By Number | Find ... | Status: ☐ Open ☒ Closed | Generator MVA Base: 100,00

ID: 1 | Find By Name | Find ...

Bus Name: 1 | Fuel Type: UN (Unknown) | [PW=0] [EPC=0] | Unit Type:

Area Name: 1 | Labels ...

Display Information | **Power and Voltage Control** | Costs | Fault Parameters | Owners, Area, etc | Custom

Power Control

MW Setpoint: 0 | MW Output: 0,000 | Part. Factor: 10,00

Min. MW Output: 0,000 | ☒ Available for AGC

Max. MW Output: 1000,000 | ☒ Enforce MW Limits during automatic control

Voltage Control

Mvar Output: 0,000 | ☒ Available for AVR | Regulated Bus Number: 1

Min Mvars: -9900,000 | ☐ Use Capability Curve | SetPoint Voltage: 1,000000

Max Mvars: 9900,000 | SetPoint Voltage Tol: 0,000000

Mvar Capability Curve

	MW	Min Mvar	Max Mvar
1			
2			
3			
4			
5			

Remote RegFactor: 100,0

Line Drop Compensation

Use LDC: No | Xcomp: 0,000100 | Rcomp: 0,000000

Wind Control Mode

Mode: None | Power Factor: 1,0000

Voltage Droop Control

Name: | Find... | Clear | Add...

OK | Save | Save to Aux | Cancel | Help

Fonte: Autor

20. AJUSTE DA ORIENTAÇÃO DO GERADOR

Caso seja necessário alterar a posição ou orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar, clique duas vezes sobre o elemento de geração para acessar suas propriedades gráficas.

Realize o ajuste do campo de orientação conforme a disposição desejada no modelo do sistema e confirme a alteração.

A Figura 20 apresenta a janela de configuração utilizada para ajustar a orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar. Essa alteração tem finalidade visual, permitindo organizar a representação gráfica do sistema elétrico de forma adequada.

Figura 20 – Ajuste da orientação gráfica do gerador no PowerWorld Simulator

Fonte: Autor

21. CONEXÃO DO GERADOR À BARRA DO SISTEMA

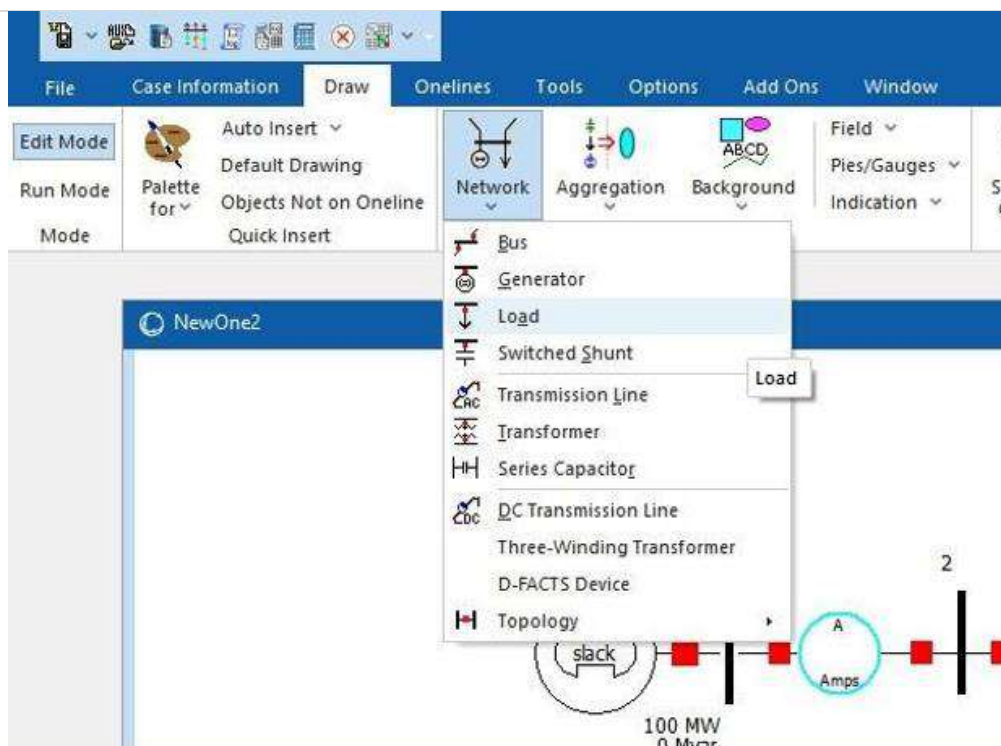
Após configurar o gerador, realize a conexão do elemento de geração à Barra 1 do sistema elétrico. Certifique-se de que o gerador esteja corretamente associado à barra, garantindo sua integração ao modelo da rede para a realização dos estudos de fluxo de potência e da montagem da matriz de admitância nodal (Ybus).

22. INSERÇÃO DA CARGA NA BARRA 4

Após concluir a conexão do gerador ao sistema, insira uma carga na Barra 4. Para isso, acesse o menu Network e selecione a opção Load.

Em seguida, clique sobre a Barra 4 para inserir o elemento de carga no sistema elétrico. Ao realizar a inserção, será aberta a janela de configuração da carga, na qual serão definidos os parâmetros elétricos do elemento nas etapas seguintes.

Figura 21 – Inserção de uma carga na Barra 4 utilizando o PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

23. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARGA

Após inserir a carga na Barra 4, clique sobre ela para abrir a janela de configuração de seus parâmetros elétricos.

Na janela apresentada, informe a potência ativa (P) como 50 MW e a potência reativa (Q) como 10 MVar. Após inserir os valores, clique em "OK" para confirmar a configuração da carga.

A Figura 22 - Configuração da carga no PowerWorld Simulator, destacando os campos utilizados para a definição das potências ativa e reativa do elemento.

Load Options

Bus Number: 4
 ID: 1
 Bus Name: 4
 Labels ...

Find By Number
 Find ...
 Find By Name

Status
☐ Open
☒ Closed

Area: Change 1 1
 Zone: Change 1 1
 Substation:
 Owner: Change 1 1
☒ Same Owner as Terminal Bus
 Data Maintainer:

Load Information: OPF Load Dispatch Custom

Constant Power Constant Current Constant Impedance

MW Value: 50,000
 Mvar Value: 10,000

Distributed Generation
☐ Open ☒ Closed
 MW: 0,000 Min MW: 0,000
 Mvar: 0,000 Max MW: 0,000

Display Information:
 Display Size: 10,00
☒ Scale Width with Size
 Display Width: 3,75
 Pixel Thickness: 1
 Orientation:
☐ Right ☐ Left
☒ Up ☐ Down
☒ Anchored
 Link To New Load

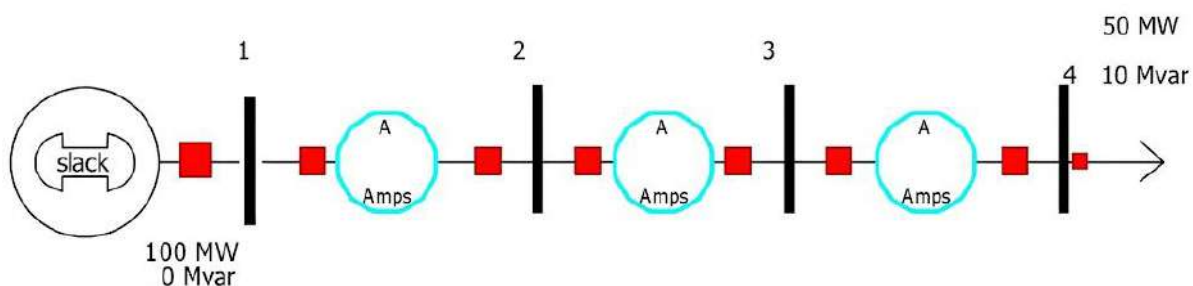
OK Save Save to Aux Cancel Help

Fonte: Autor

24. VERIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA CARGA

Após concluir a configuração dos parâmetros da carga, verifique se os valores informados correspondem aos especificados na atividade. A carga conectada à Barra 4 deve apresentar potência ativa de 50 MW e potência reativa de 10 MVar, conforme definido na etapa anterior.

A Figura 23 - Configuração final da carga no PowerWorld Simulator, servindo como referência para conferência dos parâmetros antes da execução das análises do sistema elétrico.



Fonte: Autor

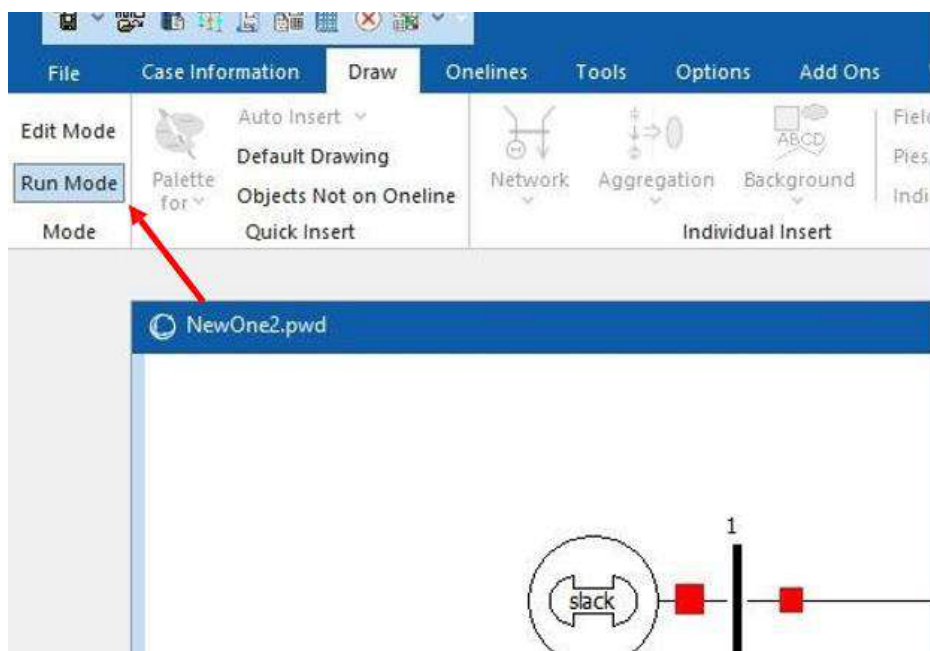
25. EXECUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após concluir a montagem e configuração do sistema elétrico, deve-se executar o cálculo do fluxo de potência. Para iniciar a simulação, altere o ambiente do PowerWorld Simulator para o modo de execução ("Run Mode").

Essa etapa permite que o software realize os cálculos elétricos da rede, determinando os fluxos de potência e as condições operacionais do sistema modelado.

A Figura 24 apresenta a seleção do modo "Run Mode" no PowerWorld Simulator, utilizado para executar a simulação do sistema elétrico após a etapa de modelagem. Nesse modo, o software realiza os cálculos do fluxo de potência e permite a análise dos resultados obtidos.

Figura 24 – Seleção do modo Run Mode no PowerWorld Simulator



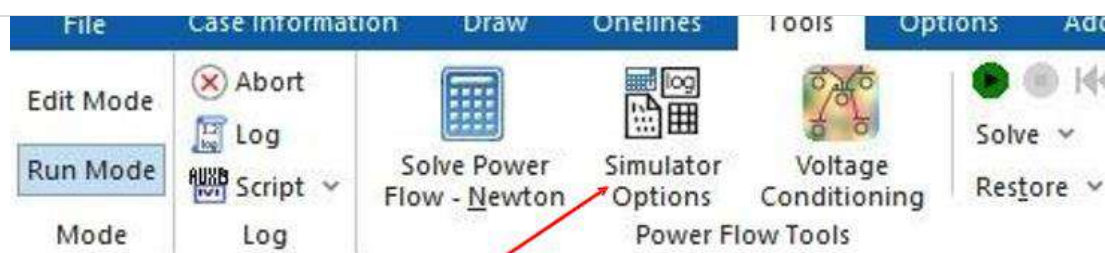
Fonte: Autor

26. ACESSO ÀS OPÇÕES DO SIMULADOR

Para configurar os parâmetros necessários à execução do fluxo de potência, acesse novamente o menu "Simulator Options" do PowerWorld Simulator.

A Figura 25 apresenta o acesso ao menu "Simulator Options" durante a etapa de execução do fluxo de potência. Essa opção permite realizar ajustes adicionais nos parâmetros do simulador antes da obtenção dos resultados da análise do sistema elétrico.

Figura 25 – Acesso ao menu Simulator Options durante a execução da simulação



Fonte: Autor

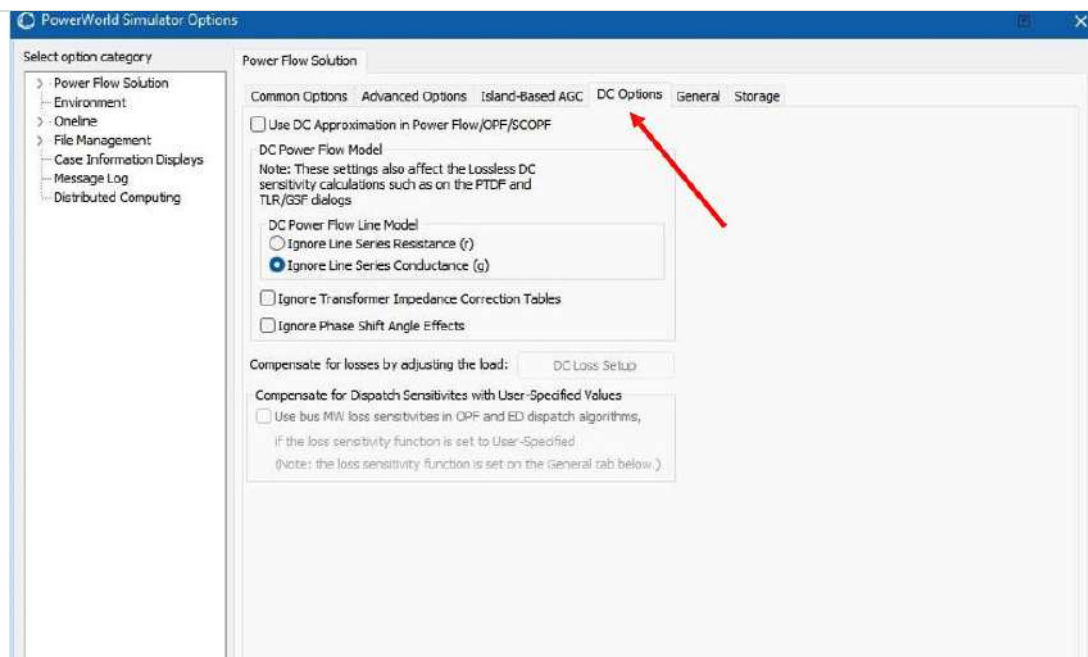
27. CONFIGURAÇÃO DAS OPÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA CC

Após acessar o menu "Simulator Options", será aberta uma janela de configuração do simulador. Selecione a opção "DC Options" e ajuste os parâmetros conforme apresentados na Figura 26.

Essa configuração define as opções utilizadas pelo PowerWorld Simulator para realizar o cálculo do fluxo de potência linearizado (Fluxo CC), considerando as características específicas do modelo de análise.

A Figura 24 apresenta a janela "DC Options" do PowerWorld Simulator, utilizada para configurar os parâmetros do método de fluxo de potência linearizado. Essa etapa prepara o simulador para realizar os cálculos de potência ativa e análise do comportamento do sistema elétrico utilizando o modelo CC.

Figura 26 – Configuração das opções do Fluxo de Potência CC no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

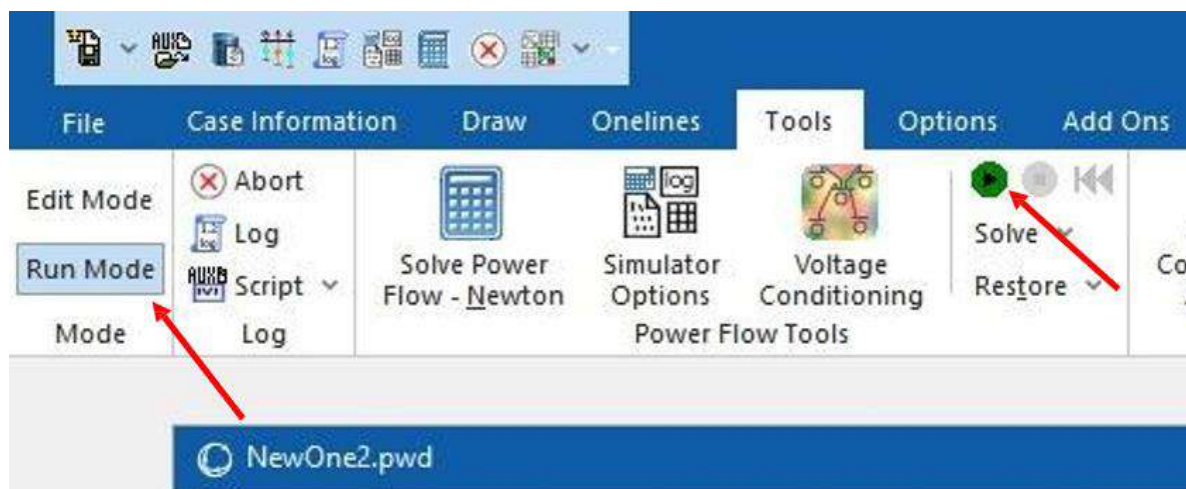
28. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após configurar os parâmetros do fluxo de potência linearizado, execute a simulação no PowerWorld Simulator. Para isso, acesse o menu "Tools" e selecione a opção "Play" (botão verde), iniciando o processamento dos cálculos pelo simulador.

Essa etapa permite que o software execute a solução do fluxo de potência e apresente os resultados operacionais do sistema elétrico modelado.

A Figura 27 apresenta o comando "Play" localizado no menu "Tools" do PowerWorld Simulator, utilizado para iniciar a execução da simulação. Após esse comando, o software realiza os cálculos do fluxo de potência conforme as configurações definidas anteriormente.

Figura 27 – Execução da simulação utilizando o comando Play no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

29. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após a execução da simulação, consulte os resultados obtidos para cada barra do sistema elétrico. Para isso, clique sobre cada uma das barras (1, 2, 3 e 4) para abrir a janela de informações correspondente.

Em seguida, registre os valores de tensão (Voltage) e ângulo (Angle) apresentados pelo PowerWorld Simulator para cada barra. Esses dados serão utilizados nas etapas posteriores da atividade para análise do comportamento do sistema elétrico e comparação com os resultados obtidos por meio da matriz de admitância nodal (Ybus).

Figura 28 – Visualização das variáveis elétricas no PowerWorld Simulator

Bus Information for Present

Bus Number: 2
 Bus Name: 2
 Nom. Voltage: 138,000
 Labels: no labels
 Area: 1
 Zone: 1
 Substation:
 Owner: 1
 Voltage (p.u.): 1,000000
 Angle (deg): -5,730
 Data Maintainer:
 Voltage (kV): 138,000
 Angle (rad): -0,10000
 Status: ☒ Connected
 View Island Dialog
 View Area Dialog
 View Zone Dialog
 View Substation Dialog
 View Owner Dialog
 Slack Bus: ☐

Device Info | Limits | OPF | Geography | Custom | GIC | Branches | Stability

Generator Information
 Total MW: 0,0
 Total Mvar: 0,0
 View/Edit Generators

Switched Shunt Information
 Actual Nominal
 G (MW)
 B (Mvar)
 View/Edit Switched Shunts

Load Information
 Current MW: 100,0
 Current Mvar: 0,0
 View/Edit Bus Loads

Bus Shunt Admittance
 Actual Nominal
 G (MW)
 B (Mvar)
 View/Edit Bus Shunt Admittance

Bus Voltage Regulation
 Desired PU Voltage: 1,0000
 Bus Voltage Regulator Devices
 Regulated by :
 Generator: 2 (2_138,0) #1

Fonte: Autor

30. ELABORAÇÃO DA TABELA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os valores obtidos na simulação, elabore uma tabela contendo as informações de tensão (pu) e ângulo (°) das Barras 1, 2, 3 e 4.

Após a organização dos dados, realize uma análise dos resultados, verificando o comportamento das tensões ao longo do sistema elétrico. Observe as variações de magnitude e ângulo entre as barras, identificando possíveis quedas de tensão decorrentes da transmissão

de potência e comentando a influência da carga conectada à Barra 4 sobre o perfil de tensão da rede.

A Tabela 1 deverá apresentar os valores obtidos na simulação, servindo de base para as análises e conclusões desta atividade prática.

Avaliando os resultados:

Com base nos valores de tensão e ângulo obtidos para as Barras 1, 2, 3 e 4, analise o comportamento do sistema elétrico após a execução do fluxo de potência. Verifique se os níveis de tensão permanecem dentro de limites adequados e observe como a presença da carga conectada à Barra 4 influencia o perfil de tensão da rede.

Na análise, procure responder aos seguintes questionamentos:

- As tensões das barras permaneceram próximas do valor nominal?
- Houve redução gradual da tensão ao longo das barras do sistema?
- Como os ângulos de tensão variaram entre as barras?
- Os resultados obtidos são coerentes com a topologia da rede e com a posição da carga?

Checklist:

- ✓ Software PowerWorld Simulator aberto e novo caso de estudo criado;
- ✓ Parâmetros iniciais do simulador configurados, incluindo base de potência e sistema de unidades;
- ✓ Ambiente de simulação e opções de visualização do diagrama unifilar configurados;
- ✓ Sistema elétrico modelado no software, com inserção das quatro barras, linhas de transmissão, gerador e carga;
- ✓ Barra de referência (Slack Bus) configurada corretamente e demais barras inseridas sem essa configuração;
- ✓ Parâmetros elétricos das linhas de transmissão, do gerador e da carga definidos conforme o modelo proposto;
- ✓ Fluxo de potência executado no PowerWorld Simulator;
- ✓ Valores de tensão e ângulo das Barras 1, 2, 3 e 4 obtidos por meio da simulação;
- ✓ Tabela com os resultados de tensão e ângulo elaborada;
- ✓ Resultados da simulação analisados, avaliando o comportamento das tensões e dos ângulos ao longo do sistema elétrico e sua relação com a matriz de admitância nodal (Ybus).

RESULTADOS

Resultados do experimento:

Ao final desta aula prática, você deverá entregar um relatório (em Word).

O relatório deverá conter:

- ✓ Objetivo da prática.
- ✓ Descrição do sistema elétrico modelado no PowerWorld Simulator.
- ✓ Configuração dos parâmetros das barras, linhas de transmissão, gerador e carga.
- ✓ Representação do sistema elétrico desenvolvido no software.
- ✓ Resultado do fluxo de potência obtido por simulação.
- ✓ Tabela contendo os valores de tensão e ângulo das Barras 1, 2, 3 e 4.
- ✓ Análise dos resultados da simulação, destacando o comportamento das tensões e dos ângulos no sistema elétrico.
- ✓ Discussão dos resultados, relacionando-os com a modelagem da matriz de admitância nodal (Y_{bus}).
- ✓ Conclusão da atividade.

Resultados de Aprendizagem:

Ao final desta prática, o estudante será capaz de compreender a aplicação da matriz de admitância nodal (Y_{bus}) na modelagem e análise de sistemas elétricos de potência. Além disso, será capaz de representar um sistema elétrico de quatro barras no ambiente computacional, configurar os parâmetros das barras, linhas de transmissão, gerador e carga, bem como executar a simulação do fluxo de potência utilizando o PowerWorld Simulator.

O estudante também desenvolverá habilidades na interpretação dos resultados obtidos pela simulação, analisando os valores de tensão e ângulo das barras do sistema e relacionando-os ao comportamento elétrico da rede e à influência da carga conectada ao sistema. Espera-se ainda que realize os procedimentos de modelagem e análise de forma organizada e criteriosa, verificando a correta configuração do sistema, a consistência dos resultados computacionais e a coerência entre a modelagem desenvolvida e os resultados obtidos, desenvolvendo autonomia e rigor técnico na resolução de problemas relacionados aos sistemas elétricos de potência.

ROTEIRO DE AULA PRÁTICA

SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA AVANÇADOS

Unidade: Unidade 3 – Estabilidade no Sistema Elétrico de Potência.

Aula: Aula 11 - Estabilidade e Colapso de Tensão.

OBJETIVOS

Definição dos objetivos da aula prática:

- Montar o sistema elétrico de potência no PowerWorld Simulator a partir dos parâmetros fornecidos;
- Realizar a simulação do fluxo de potência para obtenção das grandezas elétricas do sistema;
- Inserir um capacitor em série na rede elétrica e avaliar sua influência sobre o comportamento das tensões nas barras do sistema;
- Comparar o perfil de tensão das barras antes e após a aplicação da compensação série;
- Analisar os resultados obtidos relacionando a compensação série aos conceitos de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência.

SOLUÇÃO DIGITAL:

PowerWorld Simulator (Software Livre/Educacional)

O PowerWorld Simulator é um software computacional interativo desenvolvido para a modelagem, simulação e análise de sistemas elétricos de potência, especialmente redes de alta tensão. A ferramenta permite representar graficamente os elementos que compõem um sistema elétrico, como barras, linhas de transmissão, transformadores, geradores e cargas, possibilitando a avaliação do comportamento operacional da rede.

O software é utilizado em estudos de fluxo de carga, análise de estabilidade, curto-circuito, contingências operacionais e demais aplicações relacionadas ao planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. Por meio de sua interface gráfica, permite acompanhar as condições de operação da rede em diferentes cenários, considerando variações de geração, demanda e configuração do sistema.

No contexto desta atividade, o PowerWorld Simulator será utilizado como ferramenta de apoio para a modelagem e análise do fluxo de carga, permitindo a visualização dos resultados obtidos e a interpretação do comportamento das grandezas elétricas do sistema estudado.

PROCEDIMENTOS PRÁTICOS E APLICAÇÕES

Procedimento/Atividade nº 1

Análise da Estabilidade de Tensão com Compensação Série.

Atividade proposta:

O Aplicar os conhecimentos de Sistemas Elétricos de Potência Avançados para modelar um sistema elétrico, realizar a análise da estabilidade de tensão e avaliar o perfil de tensão das barras por meio do fluxo de potência, comparando os resultados obtidos antes e após a inserção de capacitores em série nas linhas de transmissão.

Procedimentos para a realização da atividade:

1. INÍCIO DO PROJETO:

Abra o software PowerWorld Simulator para iniciar a modelagem do sistema elétrico. Na barra de ferramentas superior, selecione a opção "File" para acessar as opções de criação ou abertura de um projeto.

A Figura 1 demonstra o acesso ao menu "File" do PowerWorld Simulator, utilizado para iniciar um novo caso de estudo ou carregar uma configuração existente. A partir dessa opção, o usuário poderá criar o modelo do sistema elétrico, inserindo posteriormente os elementos da rede, como barras, geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 1 – Tela inicial do PowerWorld Simulator para criação de um novo projeto



Fonte: Autor

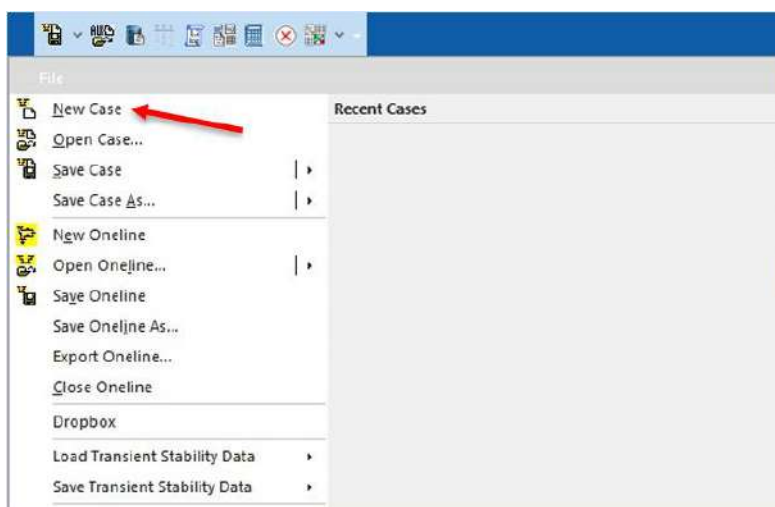
2. CONFIGURAÇÃO DA BASE:

Acesse o menu "File" e selecione a opção "New Case" para iniciar a criação de uma nova base de dados no PowerWorld Simulator. Ao executar esse comando, será aberta uma nova janela destinada à configuração inicial do caso de estudo, onde serão definidos os parâmetros básicos do sistema elétrico a ser modelado.

A Figura 2 apresenta o menu "File" do PowerWorld Simulator com a opção "New Case" selecionada. Essa função permite criar uma nova base de simulação, iniciando o processo de

modelagem do sistema elétrico de potência que será utilizado no estudo do fluxo de potência linearizado.

Figura 2 – Seleção da opção New Case para criação de uma nova base de estudo no PowerWorld Simulator



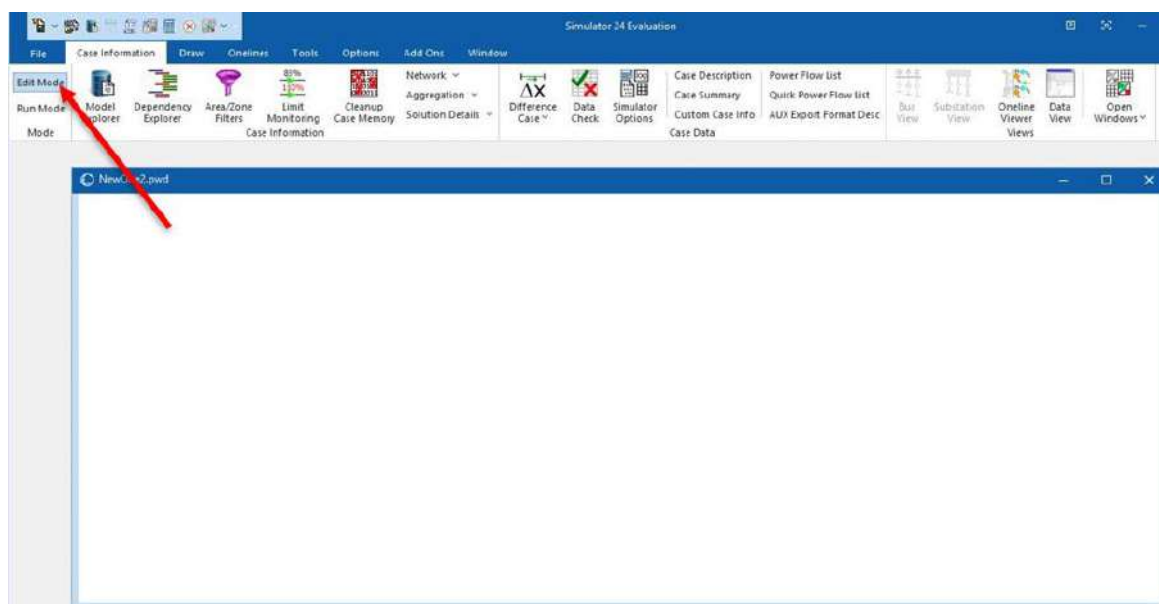
Fonte: Autor

3. CRIAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO:

Após a criação de um novo caso de estudo, será apresentada uma tela em branco no modo Edit Mode, ambiente destinado à construção e configuração do modelo do sistema elétrico. Nessa área serão inseridos os elementos da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, conforme as características do sistema a ser analisado.

A Figura X apresenta o ambiente de edição (Edit Mode) do PowerWorld Simulator após a criação de um novo caso. Essa área permite a inserção dos componentes elétricos e a montagem gráfica do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência linearizado.

Figura 3 – Área de edição para criação do modelo do sistema elétrico no PowerWorld Simulator

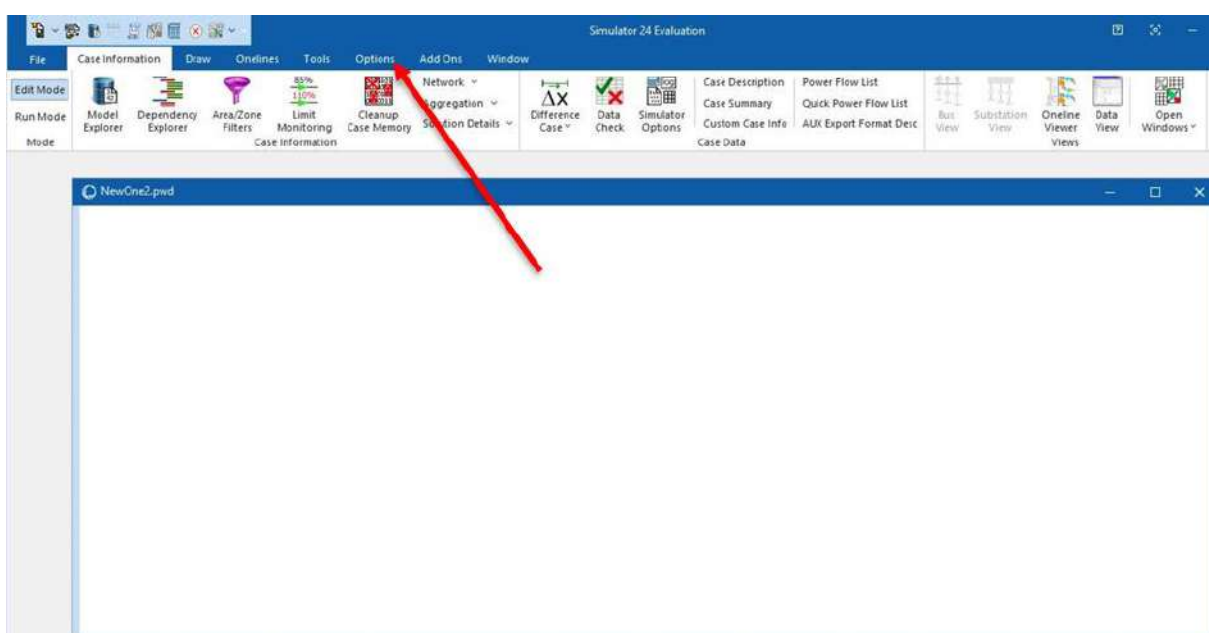


4. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Nesta etapa, deve-se definir a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico em por unidade (pu). Para realizar essa configuração, acesse o menu "Options" do PowerWorld Simulator e ajuste os parâmetros necessários conforme as características do sistema analisado.

A Figura 4 apresenta o menu "Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para acessar as configurações gerais da simulação. Nesta etapa, será definida a base de potência do sistema em valores por unidade (pu), parâmetro fundamental para a padronização dos cálculos elétricos.

Figura 4 – Acesso às configurações de base de potência no PowerWorld Simulator

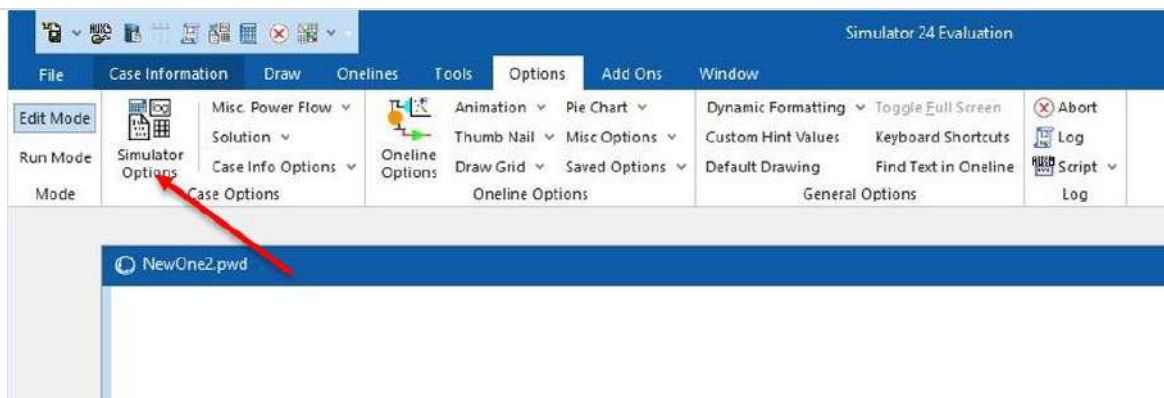


5. CONFIGURAÇÃO DAS OPÇÕES DO SIMULADOR:

Nesta etapa, acesse o menu "Simulator Options" do PowerWorld Simulator para abrir a janela de configurações do ambiente de simulação. Essas opções permitem ajustar parâmetros gerais utilizados na modelagem e execução dos estudos de fluxo de potência.

A Figura 5 apresenta o menu de acesso às opções de configuração do simulador (Simulator Options) no PowerWorld Simulator. Essa janela permite definir parâmetros gerais da simulação, que serão utilizados durante a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 5 – Acesso ao menu Simulator Options do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

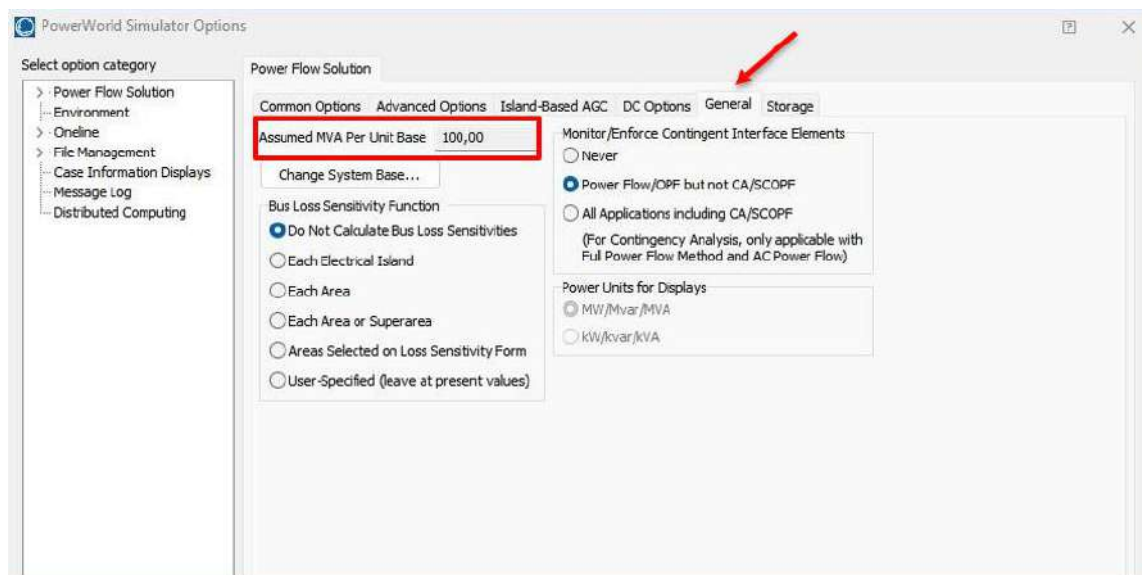
6. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Ao acessar o menu "Simulator Options", uma nova janela será aberta. Selecione a aba "General" e localize o campo "Assumed MVA Per Unit Base".

Nesse campo, informe o valor de 100,00 MVA, que será utilizado como base de potência do sistema para os cálculos realizados pelo simulador em valores por unidade (pu).

A Figura 6 apresenta a janela de configuração Simulator Options, na aba General, destacando o campo "Assumed MVA Per Unit Base", onde é definida a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico. O valor de 100 MVA é uma referência usual em estudos de sistemas de potência e será empregado nos cálculos do fluxo de potência linearizado.

Figura 6 – Configuração da base de potência no PowerWorld Simulator



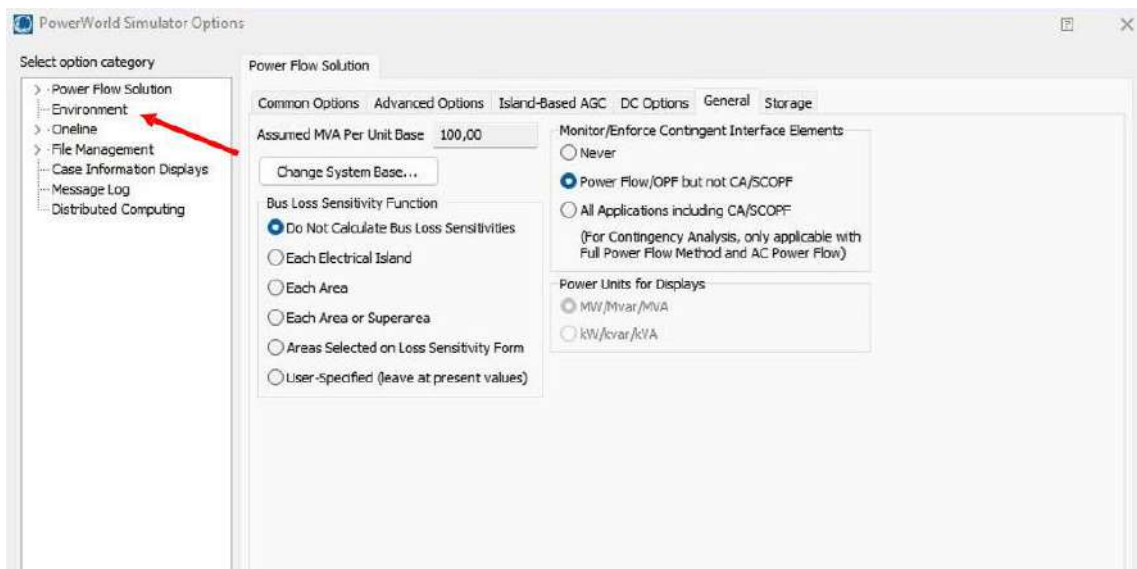
Fonte: Autor

7. CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Na mesma janela de configurações do Simulator Options, selecione a opção "Environment" para acessar os parâmetros relacionados ao ambiente de simulação do PowerWorld Simulator.

A Figura 7 apresenta a janela Simulator Options com a seleção da aba "Environment", utilizada para configurar parâmetros relacionados ao ambiente de execução da simulação. Essas configurações complementam a preparação do software para a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 7 – Acesso às configurações de ambiente do PowerWorld Simulator



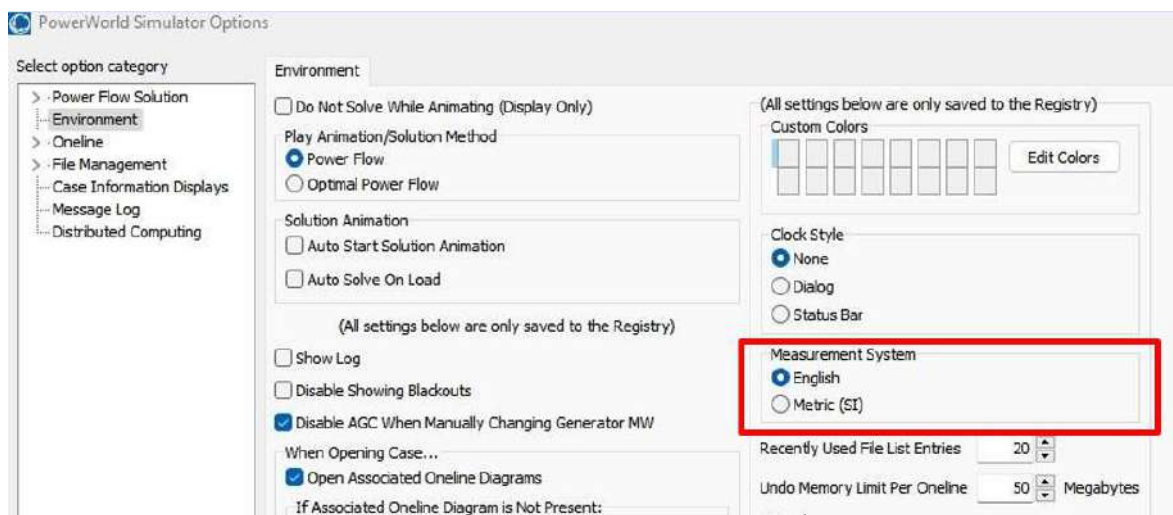
Fonte: Autor

8. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADES

Na aba "Environment", selecione a opção "Metric (SI)" para configurar o sistema de unidades utilizado pelo software. Após realizar a seleção, clique em "OK" para confirmar as alterações e aplicar as configurações definidas.

A Figura 8 apresenta a configuração do sistema de unidades na aba "Environment" do PowerWorld Simulator. A opção "Metric (SI)" define a utilização do Sistema Internacional de Unidades, padronizando a representação das grandezas elétricas e físicas utilizadas durante a modelagem e análise do sistema.

Figura 8 – Seleção do sistema de unidades Metric (SI) no PowerWorld Simulator

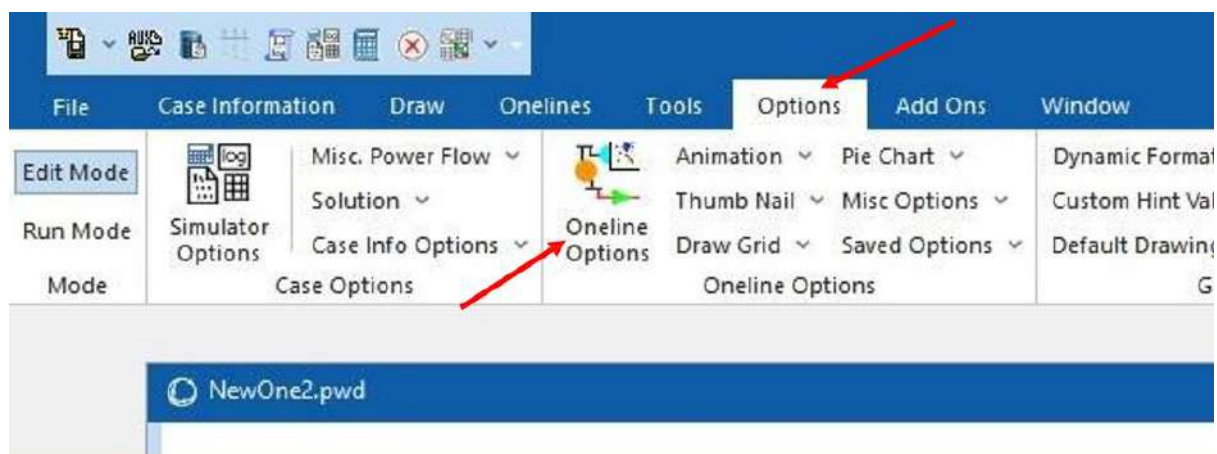


9. CONFIGURAÇÃO DO DIAGRAMA UNIFILAR

Clique novamente no menu "Options" e, em seguida, selecione a opção "Online Options" para acessar as configurações de visualização do diagrama unifilar do sistema elétrico.

A Figura 9 apresenta o acesso ao menu "Online Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para configurar a forma de representação gráfica do sistema elétrico no diagrama unifilar. Essas opções permitem ajustar aspectos de visualização dos elementos da rede durante a montagem e análise do fluxo de potência.

Figura 9 – Acesso às configurações do diagrama unifilar no PowerWorld Simulator



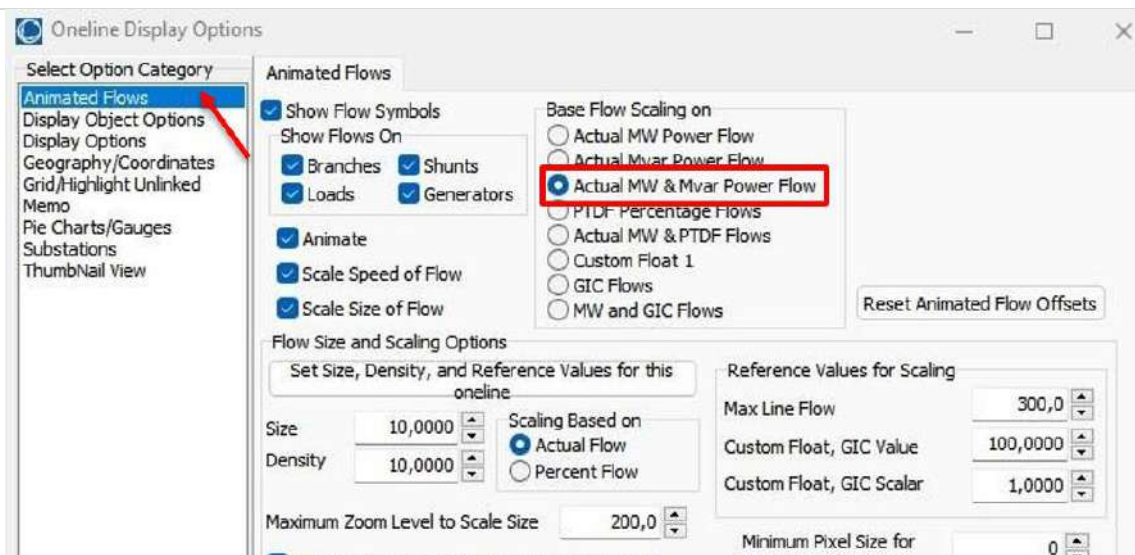
10. CONFIGURAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO DOS FLUXOS DE POTÊNCIA

Na janela "Online Options", selecione a opção "Animated Flows" para habilitar a visualização dinâmica dos fluxos no diagrama unifilar. Em seguida, marque as opções "Actual MW" e "Mvar Power Flow", permitindo a exibição dos fluxos de potência ativa e reativa no sistema.

Após realizar as configurações desejadas, clique em "Apply" para aplicar as alterações e, posteriormente, em "OK" para confirmar as configurações.

A Figura 10 apresenta a janela "Online Options", na qual são configuradas as opções de visualização dos fluxos de potência no diagrama unifilar. A seleção de "Animated Flows", "Actual MW" e "Mvar Power Flow" permite acompanhar graficamente a transferência de potência ativa e reativa entre os elementos do sistema elétrico.

Figura 10 – Configuração da visualização dos fluxos de potência no PowerWorld Simulator



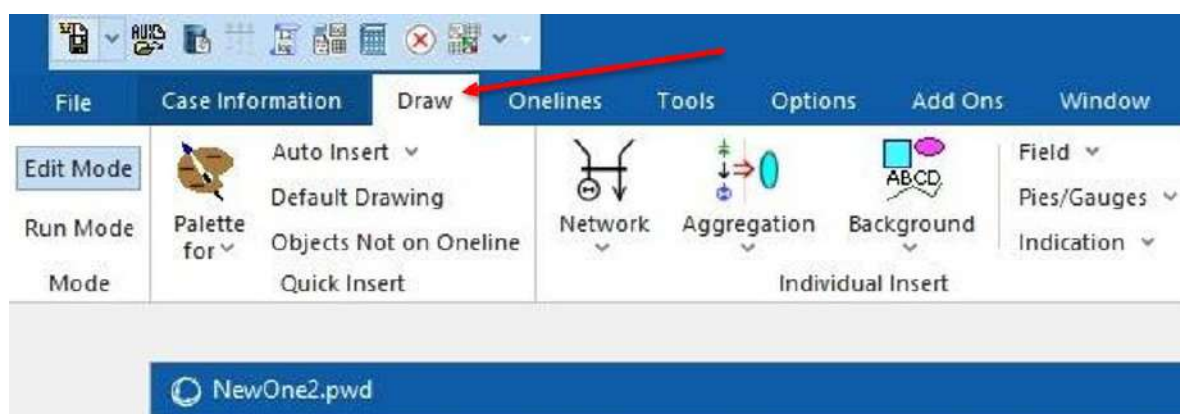
Fonte: Autor

11. MONTAGEM DO DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA

Nesta etapa, inicia-se a representação gráfica do sistema elétrico a ser simulado. Para isso, acesse o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, que disponibiliza as ferramentas necessárias para inserção e organização dos elementos da rede elétrica.

A Figura 11 apresenta o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, utilizado para realizar a montagem gráfica do sistema elétrico. Por meio dessas ferramentas, é possível inserir os componentes da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, formando o diagrama unifilar utilizado na simulação.

Figura 11 – Acesso às ferramentas de desenho do sistema no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

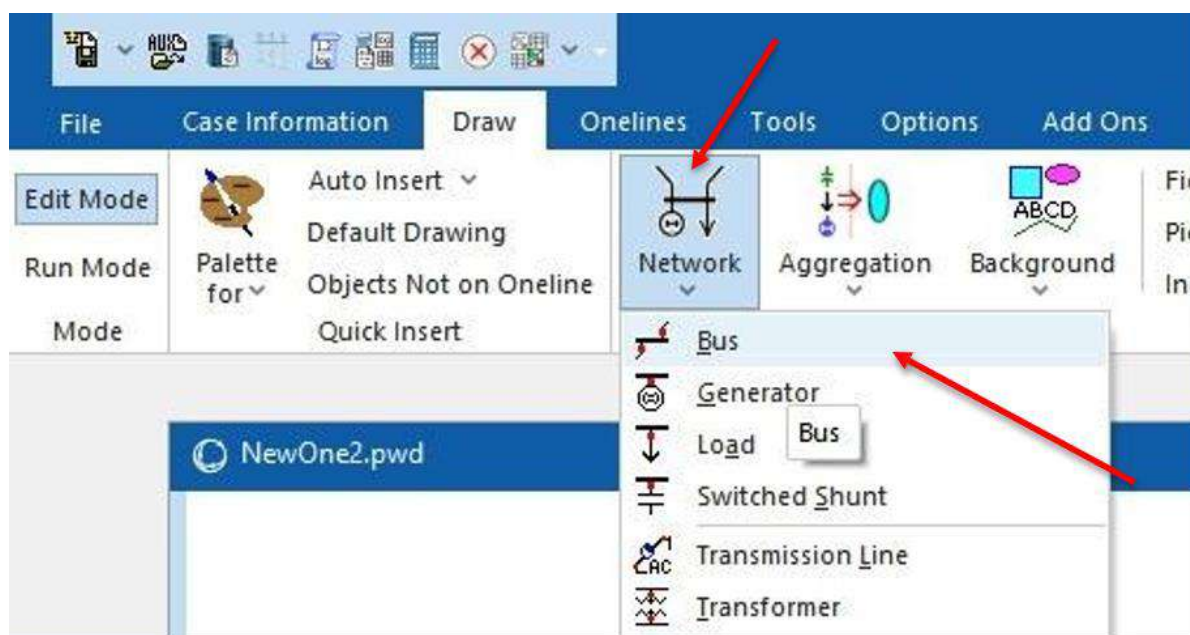
12. INSERÇÃO DA BARRA DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesta etapa, inicia-se a construção do sistema elétrico por meio da inserção das barras que representam os nós da rede. Para adicionar uma barra ao diagrama unifilar, acesse o menu "Network" e selecione a opção "Bus".

Após a seleção, a barra poderá ser posicionada no ambiente de edição do PowerWorld Simulator, dando início à montagem do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência.

A Figura 12 apresenta o procedimento de inserção de uma barra (Bus) no ambiente de modelagem do PowerWorld Simulator. As barras representam os pontos de conexão do sistema elétrico, onde são associados elementos como geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 12 – Inserção de uma barra no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

13. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA BARRA

Após inserir a barra no diagrama unifilar, clique sobre a área de edição para abrir a janela de configuração do elemento. Nesta etapa, devem ser definidos os parâmetros elétricos da barra conforme as características do sistema analisado.

Configure a tensão nominal da barra para 138 kV e ajuste os demais campos conforme os valores apresentados na tela de parâmetros.

A Figura 13 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de uma barra no PowerWorld Simulator. Nessa etapa são definidos dados elétricos importantes, como a tensão nominal do barramento, que neste estudo será considerada igual a 138 kV, além de outros parâmetros necessários para a modelagem do sistema elétrico.

Figura 13 – Janela de configuração dos parâmetros da barra no PowerWorld Simulator

Bus Options

Bus Number: 1
 Bus Name: 1
 Nominal Voltage: 138,0000 kV
 Labels ...: no labels

Find By Number
 Find By Name
 Find ...

	Number	Name
Area	1	1
Balancing Authority	1	1
Zone	1	1
Owner	1	1
Substation		

View Area Dialog
 View Zone Dialog
 View Owner Dialog
 View Substation Dialog

Data Maintainer: Change

Bus Information | Limits | Display | Attached Devices | Geography | Custom | Stability

Orientation: ☐ Right, ☒ Up, ☐ Left, ☐ Down
 Shape: ☒ Rectangle, ☐ Ellipse
 Size: 5,00
 Width: 0,300
 Scale Width with Size: ☐
 Link to New Bus

☐ Allow to Act as a Fixed Number Bus (impacts auto insertion routines)

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

14. CONFIGURAÇÃO DA BARRA DE REFERÊNCIA (SLACK BUS)

Na janela de configuração da barra, acesse a opção "Bus Information" para realizar a definição do tipo de barra no sistema elétrico. Selecione a caixa "System Slack Bus" e confirme a alteração clicando em "OK".

A barra configurada como Slack Bus será utilizada como referência angular do sistema, sendo responsável pelo balanço entre a geração e o consumo de potência durante a solução do fluxo de potência.

A Figura 14 apresenta a janela "Bus Information", destacando a opção "System Slack Bus", utilizada para definir a barra de referência do sistema elétrico. Essa configuração estabelece a barra responsável por fornecer a referência de ângulo de tensão e pelo ajuste do balanço de potência durante os cálculos do fluxo de carga.

Figura 14 – Configuração da barra de referência (System Slack Bus) no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number 1 Find By Number

Bus Name 1 Find By Name

Nominal Voltage 138,00 kV Find ...

Labels ...

	Number	Name
Area	1	1
Balancing Authority	1	1
Zone	1	1
Owner	1	
Substation		
Data Maintainer		

View Area Dialog

View Zone Dialog

View Owner Dialog

View Substation Dialog

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.) 1,00

Angle (degrees) 0,00

Bus Voltage Regulator Devices

☒ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

15. INSERÇÃO DAS DEMAIS BARRAS DO SISTEMA

Após a criação da barra de referência, devem ser inseridas as demais barras que irão compor o sistema elétrico analisado. Crie as Barras 2, 3 e 4, todas com tensão nominal de 138 kV.

Durante a configuração dessas barras, não selecione a opção "System Slack Bus", pois somente a barra de referência definida anteriormente deve exercer essa função no sistema. Após realizar as configurações, clique em "OK" para confirmar a inserção dos elementos.

Figura 15 – Configuração das demais barras do sistema no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number Find By Number

Bus Name Find By Name

Nominal Voltage kV Find ...

Labels ...

	Number	Name	
Area	1	1	View Area Dialog
Balancing Authority	1	1	View Zone Dialog
Zone	1	1	View Owner Dialog
Owner	1		View Substation Dialog
Substation			
Data Maintainer			

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.)

Angle (degrees)

☐ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

Observação:

Apenas uma barra do sistema elétrico deve ser definida como System Slack Bus, sendo esta responsável pela referência angular do sistema e pelo balanço de potência ativa e reativa durante os estudos de fluxo de potência. As demais barras devem permanecer sem essa seleção, conforme configurado na Figura 15.

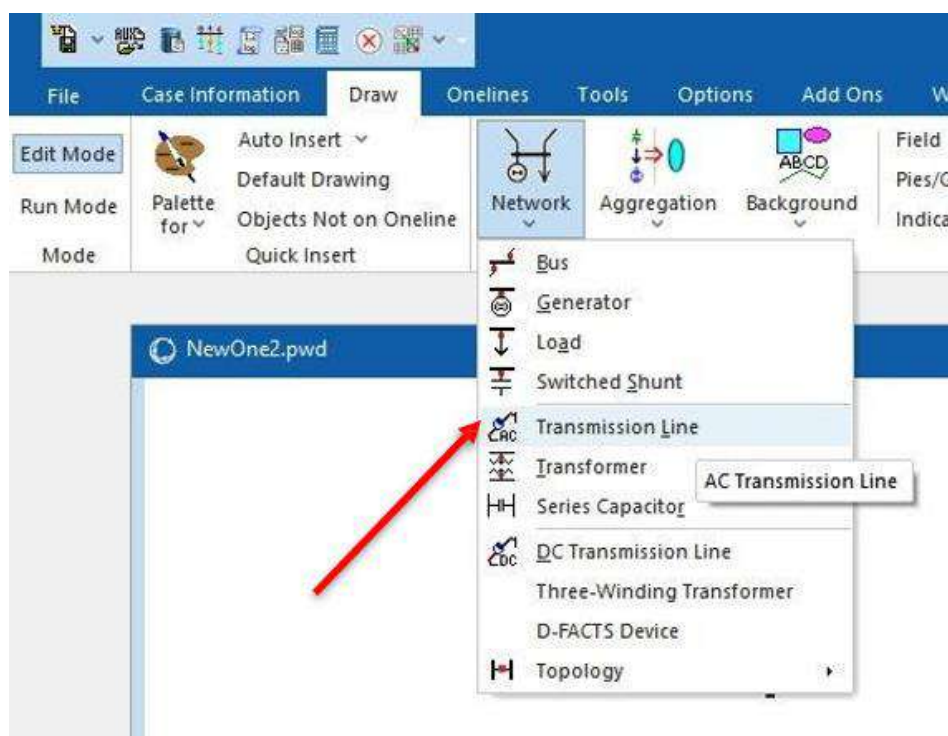
16. INSERÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Nesta etapa, deve-se realizar a interligação entre as barras do sistema elétrico por meio da inserção de uma linha de transmissão. Para isso, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Transmission Line".

Após selecionar o elemento, conecte a linha de transmissão entre as barras previamente criadas, estabelecendo a conexão necessária para a análise do fluxo de potência.

A Figura 16 apresenta o procedimento de inserção de uma linha de transmissão no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Esse elemento representa o ramo elétrico responsável pela conexão entre as barras do sistema, permitindo o fluxo de potência entre os nós da rede.

Figura 16 – Inserção da linha de transmissão entre as barras no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

17. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Após selecionar o elemento "Transmission Line", realize a conexão entre as barras do sistema conforme a sequência indicada na atividade. Inicialmente, clique sobre a Barra 1 e arraste até a Barra 2, realizando dois cliques para finalizar a inserção da linha de transmissão.

Ao concluir a ligação, será aberta uma janela de configuração dos parâmetros do elemento. Informe a resistência (R) da linha como 0,1 pu e a reatância (X) como 0,1 pu. Após inserir os valores, clique em "OK" para confirmar as configurações.

Repita o mesmo procedimento para inserir as demais linhas de transmissão do sistema, realizando as conexões entre as Barras 2 e 3 e entre as Barras 3 e 4, mantendo os mesmos valores de resistência e reatância para todos os elementos.

A Figura 17 apresenta a configuração da linha de transmissão inserida entre as barras do sistema. Nesta etapa são definidos os parâmetros elétricos dos elementos de transmissão, que serão utilizados pelo PowerWorld Simulator nos cálculos de fluxo de potência e na posterior montagem da matriz de admitância nodal (Y_{bus}).

Figura 17 – Configuração dos parâmetros elétricos da linha de transmissão

Branch Options

From Bus: 2 To Bus: 3 Circuit: 1

Number: 2 Name: 2 Area Name: 1 (1) Nominal kV: 138,0

Find By Numbers Find By Names Find ...

☒ From End Metered ☒ Default Owner (Same as From Bus)

Labels ...

Display Custom Parameters Transformer Control Stability Series Capacitor Fault Info Geography

Status: ☐ Open ☒ Closed

Branch Device Type: Line

☒ Allow Consolidation Length: 0,00 Calculate Impedances >

Normal Status: ☐ Open ☒ Closed

Per Unit Impedance Parameters

Series Resistance (R)	0,1
Series Reactance (X)	0,1
Shunt Charging (B)	0,000000
Shunt Conductance (G)	0,000000

☐ Has Line Shunts Line Shunts

MVA Limits

Limit A	0.000
Limit B	0.000
Limit C	0.000
Limit D	0.000
Limit E	0.000
Limit F	0.000
Limit G	0.000
Limit H	0.000
Limit I	0.000
Limit J	0.000
Limit K	0.000

Convert Line to Transformer Exchange From and To Buses

D-FACTS Devices on the Line ☐ Has D-FACTS

OK Save Save to Aux Cancel Help

Fonte: Autor

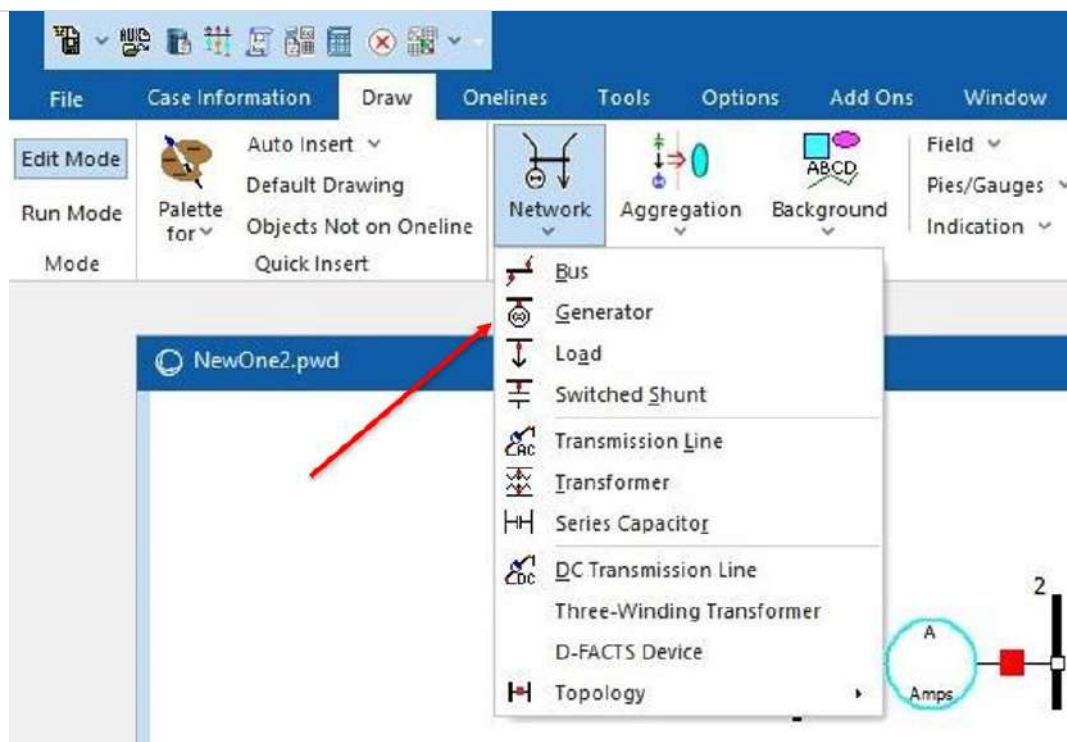
18. INSERÇÃO DOS GERADORES NAS BARRAS DO SISTEMA

Nesta etapa, devem ser inseridos os elementos de geração responsáveis pelo fornecimento de potência ao sistema elétrico. Para adicionar um gerador no diagrama unifilar, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Generator".

Após selecionar o elemento, posicione os geradores nas Barras 1 e 2, conforme a configuração proposta para o sistema analisado.

A Figura 18 apresenta o procedimento de inserção dos geradores no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Os geradores representam as fontes de potência ativa e reativa do sistema, sendo elementos fundamentais para a análise do fluxo de potência.

Figura 18 – Inserção dos geradores no sistema elétrico utilizando o PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

19. CONFIGURAÇÃO DO GERADOR NA BARRA 1

Após inserir o gerador no sistema, clique sobre a Barra 1 para abrir a janela de configuração do elemento de geração. No campo "MV Setpoint", informe o valor 0 e, em seguida, clique em "OK" para confirmar a configuração.

Essa definição estabelece o valor inicial de geração ativa associado ao gerador conectado à Barra 1, conforme os parâmetros propostos para a simulação.

A Figura 19 apresenta a janela de configuração do gerador associado à Barra 1 no PowerWorld Simulator. O campo "MW Setpoint" (potência ativa de referência do gerador) é configurado com valor igual a 0 MW, conforme definido para o modelo analisado.

Figura 19 – Configuração do gerador conectado à Barra 1

Generator Options

Bus Number: 1 | Find By Number | Find ... | Status: ☐ Open ☒ Closed | Generator MVA Base: 100,00

ID: 1 | Find By Name | Find ...

Bus Name: 1 | Fuel Type: UN (Unknown) | [PW=0] [EPC=0]

Area Name: 1 | Unit Type:

Labels ...

Display Information | **Power and Voltage Control** | Costs | Fault Parameters | Owners, Area, etc | Custom

Power Control

MW Setpoint: 0 | MW Output: 0,000 | Part. Factor: 10,00

Min. MW Output: 0,000 | ☒ Available for AGC

Max. MW Output: 1000,000 | ☒ Enforce MW Limits during automatic control

Voltage Control

Mvar Output: 0,000 | ☒ Available for AVR | Regulated Bus Number: 1

Min Mvars: -9900,000 | ☐ Use Capability Curve | SetPoint Voltage: 1,000000

Max Mvars: 9900,000 | SetPoint Voltage Tol: 0,000000

Mvar Capability Curve

	MW	Min Mvar	Max Mvar
1			
2			
3			
4			
5			

Remote RegFactor: 100,0

Line Drop Compensation

Use LDC: No

Xcomp: 0,000100

Rcomp: 0,000000

Wind Control Mode

Mode: None

Power Factor: 1,0000

Voltage Droop Control

Name:

Find... | Clear | Add...

OK | Save | Save to Aux | Cancel | Help

Fonte: Autor

20. AJUSTE DA ORIENTAÇÃO DO GERADOR

Caso seja necessário alterar a posição ou orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar, clique duas vezes sobre o elemento de geração para acessar suas propriedades gráficas.

Realize o ajuste do campo de orientação conforme a disposição desejada no modelo do sistema e confirme a alteração.

A Figura 20 apresenta a janela de configuração utilizada para ajustar a orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar. Essa alteração tem finalidade visual, permitindo organizar a representação gráfica do sistema elétrico de forma adequada.

Figura 20 – Ajuste da orientação gráfica do gerador no PowerWorld Simulator

Generator Options

Bus Number: 1 Find By Number

ID: 1 Find ...

Bus Name: 1 Find By Name

Area Name: 1 Fuel Type

Labels ...: no labels Unit Type

Display Information Power and Voltage Control Costs Fault F

Display Size: 9,0

☒ Scale Width with Size

Display Width: 6,00

Pixel Thickness: 1

☒ Anchored

Orientation

- ☐ Right
- ☐ Up
- ☒ Left
- ☐ Down

Link To New Generator

Fonte: Autor

21. CONEXÃO DO GERADOR À BARRA DO SISTEMA

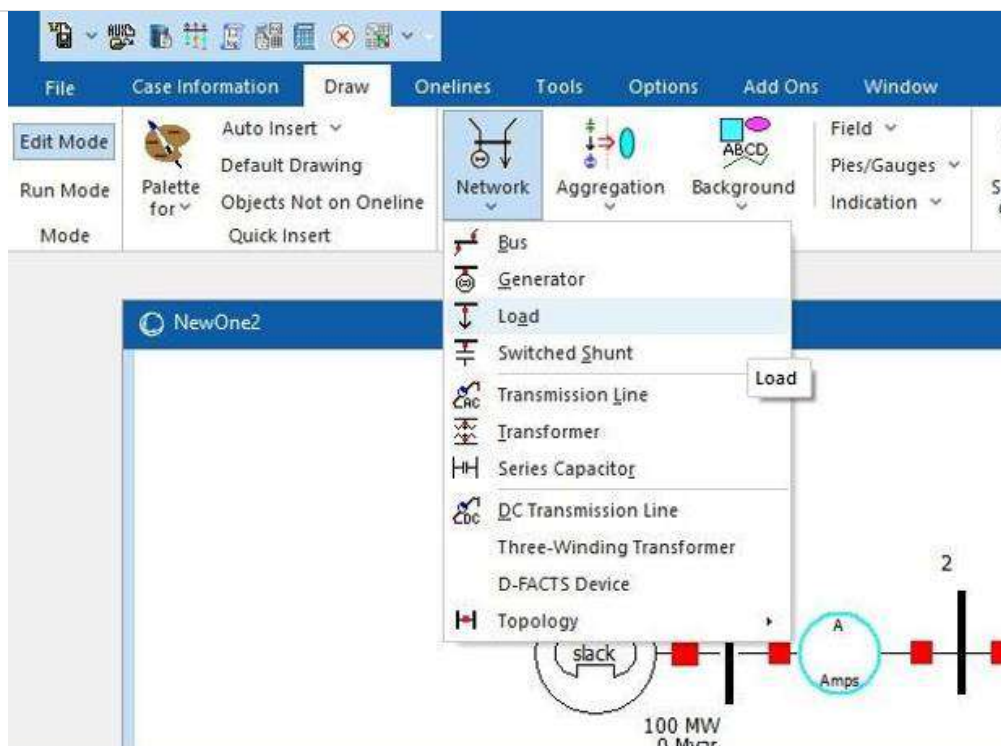
Após configurar o gerador, realize a conexão do elemento de geração à Barra 1 do sistema elétrico. Certifique-se de que o gerador esteja corretamente associado à barra, garantindo sua integração ao modelo da rede para a realização dos estudos de fluxo de potência e da montagem da matriz de admitância nodal (Ybus).

22. INSERÇÃO DA CARGA NA BARRA 4

Após concluir a conexão do gerador ao sistema, insira uma carga na Barra 4. Para isso, acesse o menu Network e selecione a opção Load.

Em seguida, clique sobre a Barra 4 para inserir o elemento de carga no sistema elétrico. Ao realizar a inserção, será aberta a janela de configuração da carga, na qual serão definidos os parâmetros elétricos do elemento nas etapas seguintes.

Figura 21 – Inserção de uma carga na Barra 4 utilizando o PowerWorld Simulator.



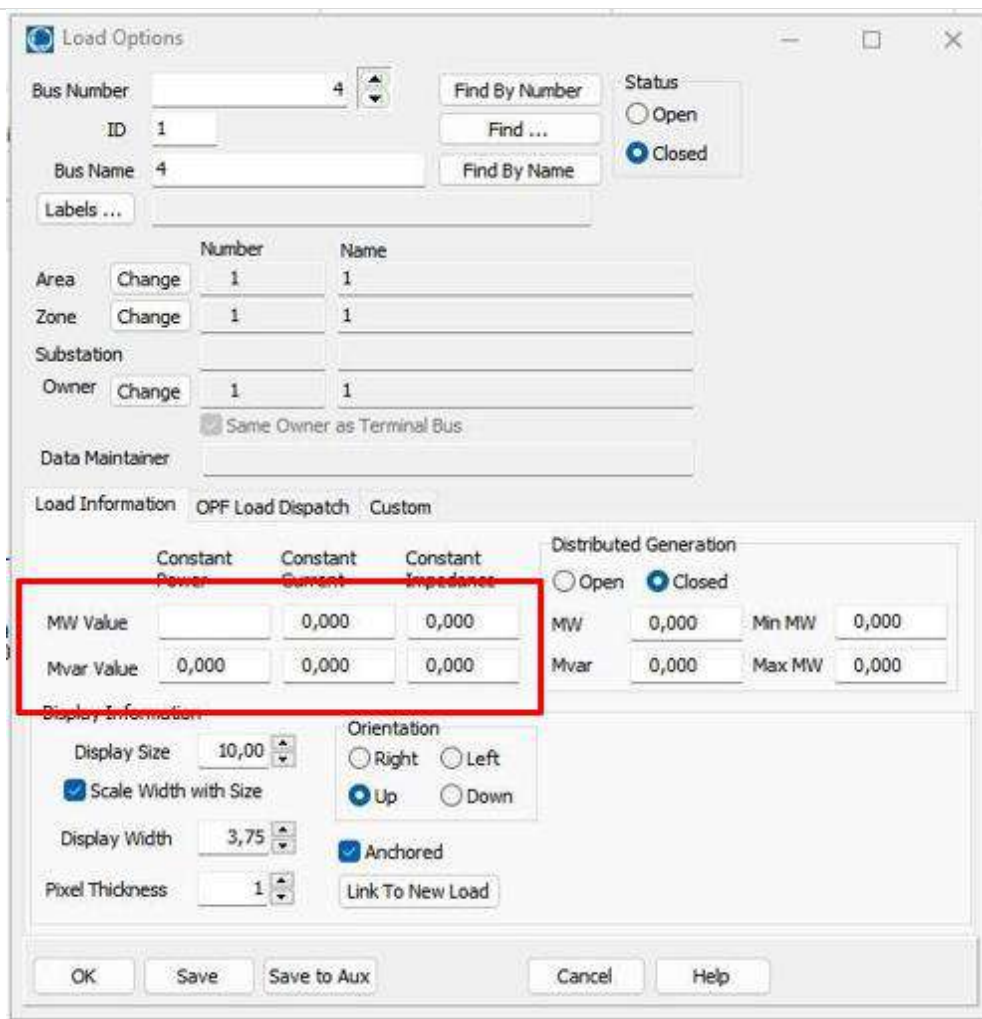
Fonte: Autor

23. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARGA

Após inserir a carga na Barra 4, clique sobre ela para abrir a janela de configuração de seus parâmetros elétricos.

Na janela apresentada, informe a potência ativa (P) como 50 MW e a potência reativa (Q) como 10 MVar. Após inserir os valores, clique em "OK" para confirmar a configuração da carga.

A Figura 22 - Configuração da carga no PowerWorld Simulator, destacando os campos utilizados para a definição das potências ativa e reativa do elemento.



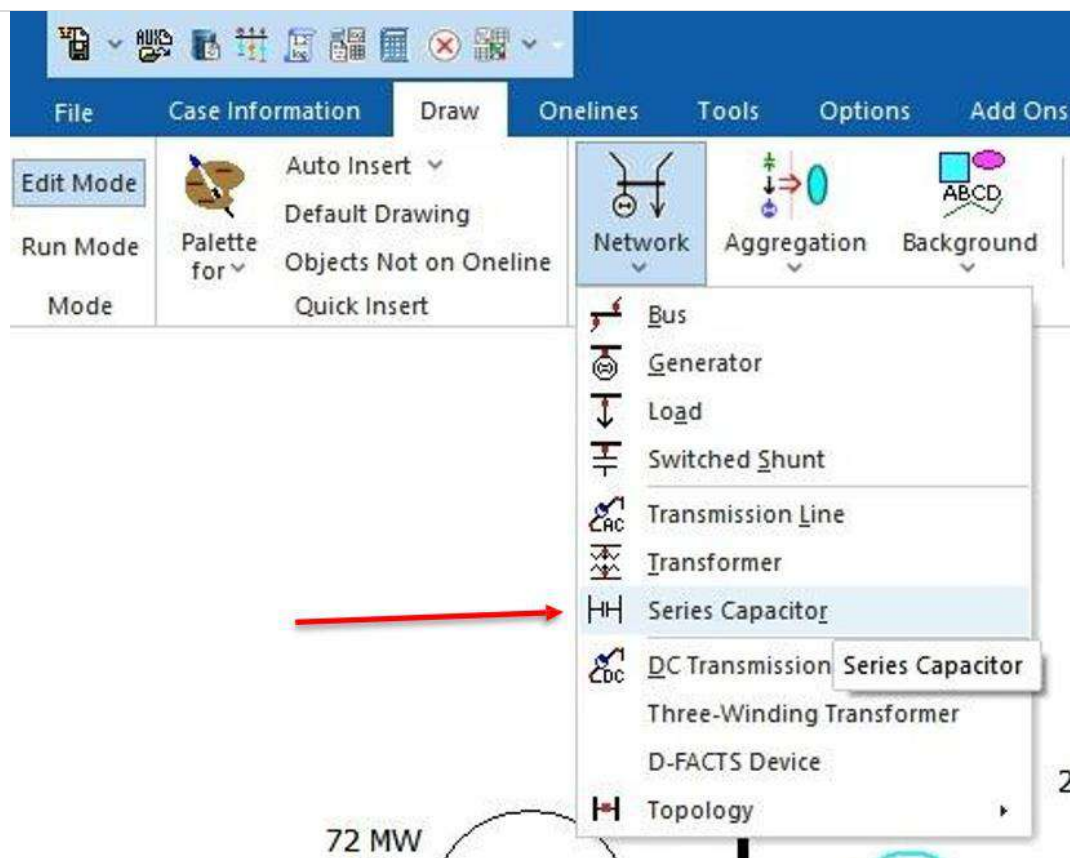
Fonte: Autor

24. INSERÇÃO DO CAPACITOR EM SÉRIE

Após concluir a modelagem do sistema elétrico, realize a inserção de um capacitor em série entre as Barras 3 e 4. Para isso, acesse o menu Network e selecione a opção Series Capacitor. Em seguida, clique sobre a Barra 3 e estenda o elemento até a Barra 4, finalizando a inserção com um duplo clique. Ao concluir esse procedimento, será aberta a janela de configuração do capacitor em série. Informe o valor de 0,1 pu e clique em "OK" para confirmar a configuração do elemento.

A Figura 23 apresenta a janela de configuração do capacitor em série inserido entre as Barras 3 e 4 no PowerWorld Simulator. Nessa etapa é definido o valor da compensação série que será utilizado na simulação para avaliar sua influência no perfil de tensão e na estabilidade do sistema elétrico.

Figura 23 – Configuração do capacitor em série entre as Barras 3 e 4 no PowerWorld Simulator.



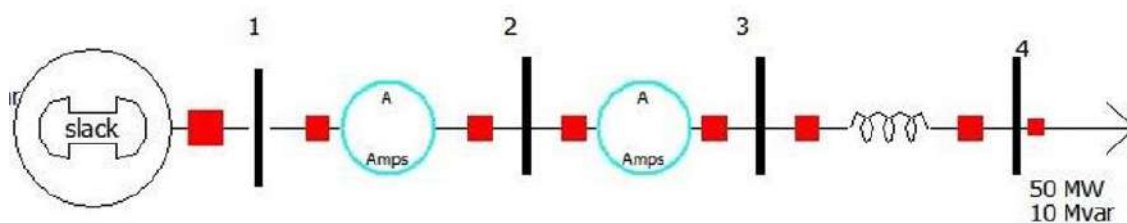
Fonte: Autor

25. VERIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO CAPACITOR EM SÉRIE

Após a inserção e configuração do capacitor em série, verifique se o elemento foi conectado corretamente entre as Barras 3 e 4 e se o valor de compensação informado corresponde ao valor especificado na atividade.

A Figura 24 apresenta a configuração final do sistema elétrico com o capacitor em série inserido entre as Barras 3 e 4 no PowerWorld Simulator. Essa representação permite confirmar a correta integração do elemento de compensação à rede antes da execução da nova simulação do fluxo de potência.

Figura 24 – Sistema elétrico com capacitor em série conectado entre as Barras 3 e 4 no PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

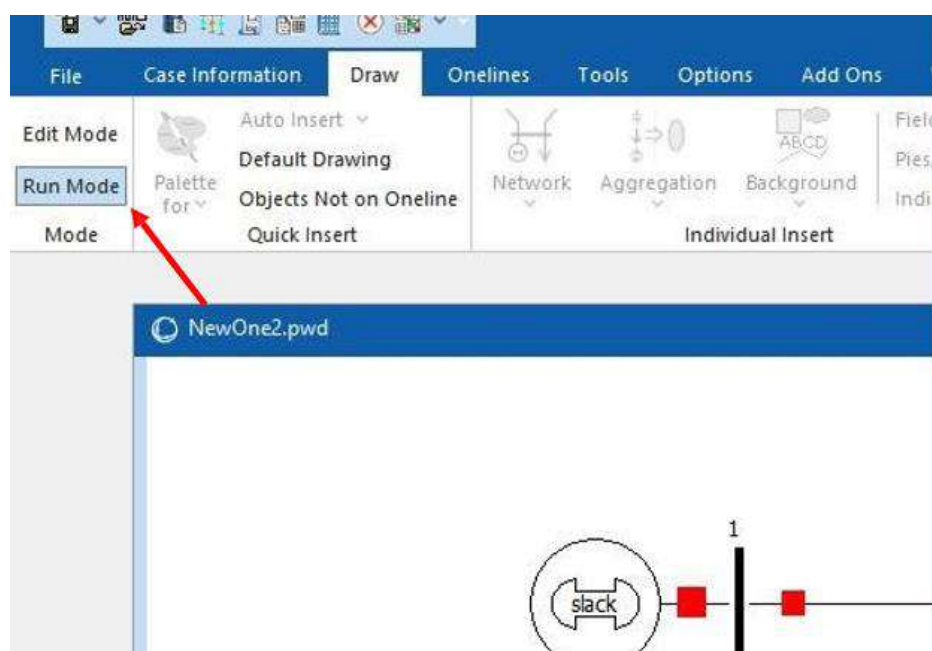
26. EXECUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após concluir a montagem e configuração do sistema elétrico, deve-se executar o cálculo do fluxo de potência. Para iniciar a simulação, altere o ambiente do PowerWorld Simulator para o modo de execução ("Run Mode").

Essa etapa permite que o software realize os cálculos elétricos da rede, determinando os fluxos de potência e as condições operacionais do sistema modelado.

A Figura 25 apresenta a seleção do modo "Run Mode" no PowerWorld Simulator, utilizado para executar a simulação do sistema elétrico após a etapa de modelagem. Nesse modo, o software realiza os cálculos do fluxo de potência e permite a análise dos resultados obtidos.

Figura 25 – Seleção do modo Run Mode no PowerWorld Simulator



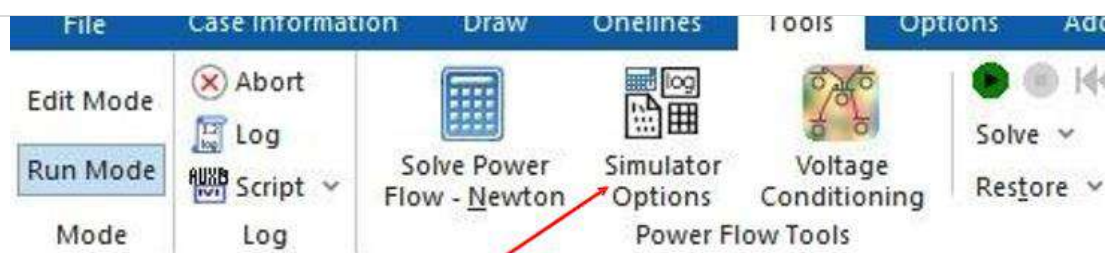
Fonte: Autor

27. ACESSO ÀS OPÇÕES DO SIMULADOR

Para configurar os parâmetros necessários à execução do fluxo de potência, acesse novamente o menu "Simulator Options" do PowerWorld Simulator.

A Figura 26 apresenta o acesso ao menu "Simulator Options" durante a etapa de execução do fluxo de potência. Essa opção permite realizar ajustes adicionais nos parâmetros do simulador antes da obtenção dos resultados da análise do sistema elétrico.

Figura 26 – Acesso ao menu Simulator Options durante a execução da simulação



Fonte: Autor

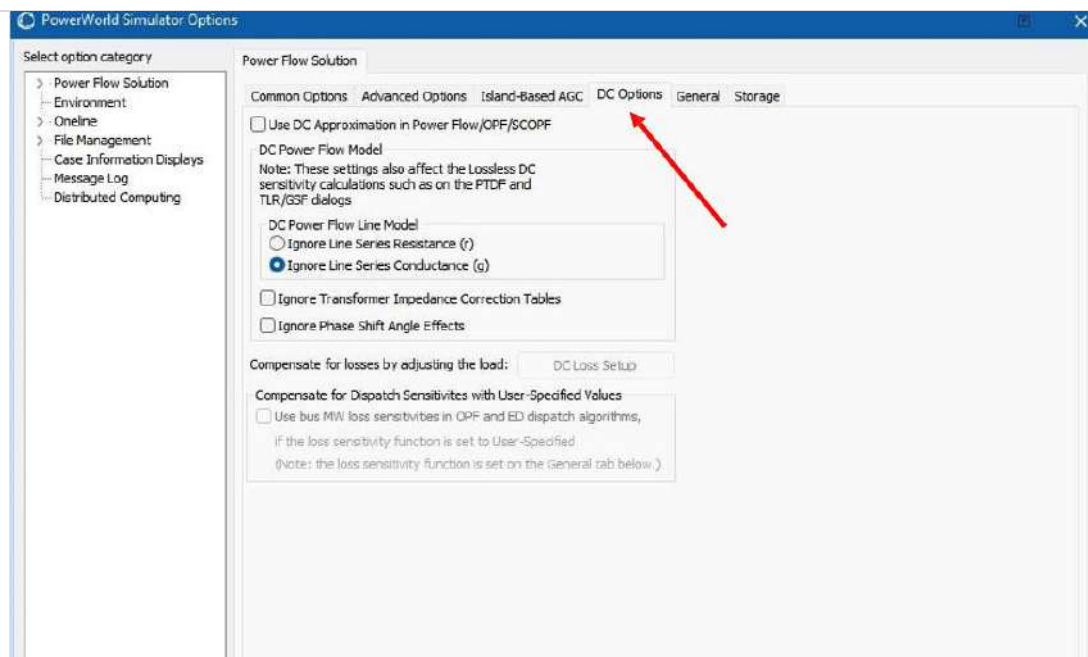
28. CONFIGURAÇÃO DAS OPÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA CC

Após acessar o menu "Simulator Options", será aberta uma janela de configuração do simulador. Selecione a opção "DC Options" e ajuste os parâmetros conforme apresentados na Figura 26.

Essa configuração define as opções utilizadas pelo PowerWorld Simulator para realizar o cálculo do fluxo de potência linearizado (Fluxo CC), considerando as características específicas do modelo de análise.

A Figura 27 apresenta a janela "DC Options" do PowerWorld Simulator, utilizada para configurar os parâmetros do método de fluxo de potência linearizado. Essa etapa prepara o simulador para realizar os cálculos de potência ativa e análise do comportamento do sistema elétrico utilizando o modelo CC.

Figura 27 – Configuração das opções do Fluxo de Potência CC no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

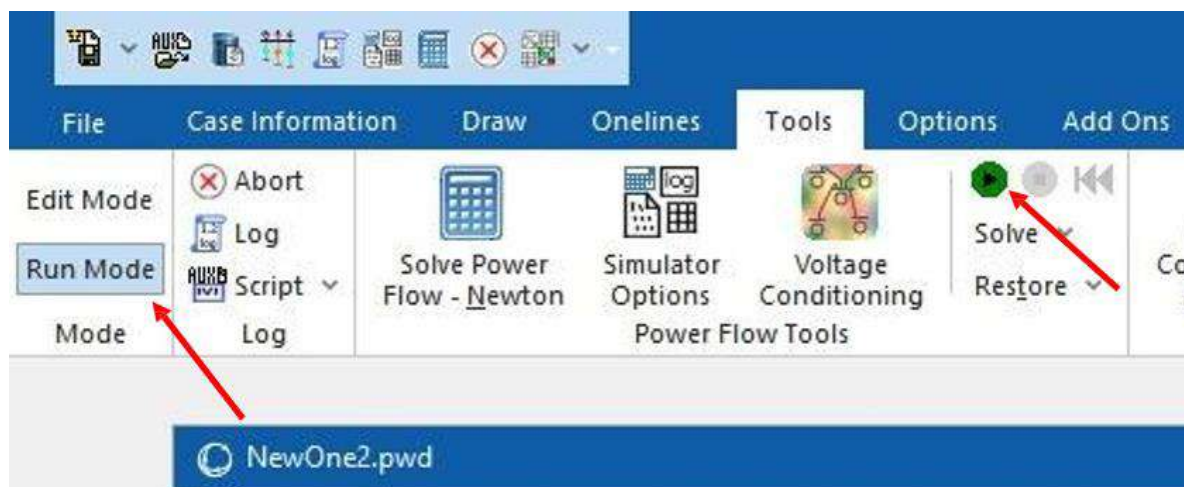
29. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após configurar os parâmetros do fluxo de potência linearizado, execute a simulação no PowerWorld Simulator. Para isso, acesse o menu "Tools" e selecione a opção "Play" (botão verde), iniciando o processamento dos cálculos pelo simulador.

Essa etapa permite que o software execute a solução do fluxo de potência e apresente os resultados operacionais do sistema elétrico modelado.

A Figura 28 apresenta o comando "Play" localizado no menu "Tools" do PowerWorld Simulator, utilizado para iniciar a execução da simulação. Após esse comando, o software realiza os cálculos do fluxo de potência conforme as configurações definidas anteriormente.

Figura 28 – Execução da simulação utilizando o comando Play no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

30. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após a execução da simulação, consulte os resultados obtidos para cada barra do sistema elétrico. Para isso, clique sobre cada uma das barras (1, 2, 3 e 4) para abrir a janela de informações correspondente.

Em seguida, registre os valores de tensão (Voltage) e ângulo (Angle) apresentados pelo PowerWorld Simulator para cada barra. Esses dados serão utilizados nas etapas posteriores da atividade para análise do comportamento do sistema elétrico e comparação com os resultados obtidos por meio da matriz de admitância nodal (Ybus).

Figura 29 – Visualização das variáveis elétricas no PowerWorld Simulator

Bus Information for Present

Bus Number: 2
 Bus Name: 2
 Nom. Voltage: 138,000
 Labels: no labels
 Area: 1
 Zone: 1
 Substation:
 Owner: 1
 Voltage (p.u.): 1,000000
 Angle (deg): -5,730
 Data Maintainer:
 Voltage (kV): 138,000
 Angle (rad): -0,10000
 Status: ☒ Connected
 View Island Dialog
 View Area Dialog
 View Zone Dialog
 View Substation Dialog
 View Owner Dialog
 Slack Bus: ☐

Device Info | Limits | OPF | Geography | Custom | GIC | Branches | Stability

Generator Information
 Total MW: 0,0
 Total Mvar: 0,0
 View/Edit Generators

Switched Shunt Information
 Actual | Nominal
 G (MW):
 B (Mvar):
 View/Edit Switched Shunts

Load Information
 Current MW: 100,0
 Current Mvar: 0,0
 View/Edit Bus Loads

Bus Shunt Admittance
 Actual | Nominal
 G (MW):
 B (Mvar):
 View/Edit Bus Shunt Admittance

Bus Voltage Regulation
 Desired PU Voltage: 1,0000
 Bus Voltage Regulator Devices
 Regulated by :
 Generator: 2 (2_138,0) #1

Fonte: Autor

31. ELABORAÇÃO DA TABELA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os valores obtidos na simulação, elabore uma tabela contendo as informações de tensão (pu) e ângulo (°) das Barras 1, 2, 3 e 4.

Após a organização dos dados, realize uma análise dos resultados, verificando o comportamento das tensões ao longo do sistema elétrico. Observe as variações de magnitude e ângulo entre as barras, identificando possíveis quedas de tensão decorrentes da transmissão

de potência e comentando a influência da carga conectada à Barra 4 sobre o perfil de tensão da rede.

A Tabela 1 deverá apresentar os valores obtidos na simulação, servindo de base para as análises e conclusões desta atividade prática.

Avaliando os resultados:

Com base nos valores de tensão e ângulo obtidos após a inserção do capacitor série entre as Barras 3 e 4, analise como esse elemento alterou o comportamento do sistema elétrico. Verifique a eficácia da compensação na regulação da tensão e na melhoria das condições de operação da rede.

Na análise, procure responder aos seguintes questionamentos:

- Houve melhora significativa nos níveis de tensão da Barra 4 após a inserção do capacitor? (Compare o valor de tensão antes e depois da compensação para verificar se o capacitor mitigou a queda de tensão).
- Como a compensação série influenciou o perfil de tensão ao longo das barras em comparação com o cenário sem o capacitor? (Avalie se a queda de tensão entre a Barra 1 e a Barra 4 tornou-se menos acentuada).
- Houve alteração na defasagem angular entre as barras após a inserção do elemento compensador? (Observe se a inserção do capacitor reduziu a diferença de ângulo entre o barramento Slack e a carga).
- Os resultados obtidos são coerentes com o efeito esperado de uma compensação série capacitiva na rede? (Valide se a redução da reatância série total do sistema refletiu em uma melhor performance de transmissão).

Checklist:

- ✓ Software PowerWorld Simulator aberto e novo caso de estudo criado;
- ✓ Parâmetros iniciais do simulador configurados, incluindo base de potência e sistema de unidades;
- ✓ Ambiente de simulação e opções de visualização do diagrama unifilar configurados;
- ✓ Sistema elétrico modelado no software, com inserção das quatro barras, linhas de transmissão, gerador e carga;
- ✓ Barra de referência (Slack Bus) configurada corretamente e demais barras inseridas sem essa configuração;
- ✓ Parâmetros elétricos das linhas de transmissão, do gerador e da carga definidos conforme o modelo proposto;
- ✓ Fluxo de potência executado no PowerWorld Simulator para obtenção do perfil inicial de tensão do sistema;

- ✓ Capacitor em série inserido entre as Barras 3 e 4 e configurado conforme o valor especificado na atividade;
- ✓ Nova simulação de fluxo de potência realizada após a inserção da compensação série;
- ✓ Valores de tensão e ângulo das Barras 1, 2, 3 e 4 obtidos antes e após a inserção do capacitor em série;
- ✓ Tabela com os resultados de tensão e ângulo elaborada para comparação dos cenários analisados;
- ✓ Resultados da simulação analisados, avaliando a influência da compensação série no perfil de tensão e na estabilidade do sistema elétrico.

RESULTADOS

Resultados do experimento:

Ao final desta aula prática, você deverá entregar um relatório (em Word).

O relatório deverá conter:

- ✓ Objetivo da prática.
- ✓ Descrição do sistema elétrico modelado no PowerWorld Simulator.
- ✓ Configuração dos parâmetros das barras, linhas de transmissão, gerador e carga.
- ✓ Representação do sistema elétrico desenvolvido no software.
- ✓ Resultado do fluxo de potência obtido por simulação antes da inserção da compensação série.
- ✓ Configuração do capacitor em série inserido entre as Barras 3 e 4.
- ✓ Resultado do fluxo de potência obtido após a inserção do capacitor em série.
- ✓ Tabela contendo os valores de tensão e ângulo das Barras 1, 2, 3 e 4 para os cenários analisados.
- ✓ Comparação entre os resultados obtidos antes e após a inserção do capacitor em série.
- ✓ Análise dos resultados da simulação, destacando a influência da compensação série no perfil de tensão e na estabilidade do sistema elétrico.
- ✓ Discussão dos resultados, relacionando-os aos conceitos de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência.
- ✓ Conclusão da atividade.

Resultados de Aprendizagem:

Ao final desta prática, o estudante será capaz de compreender os conceitos relacionados à estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência e a influência da compensação série no comportamento da rede. Além disso, será capaz de representar um sistema elétrico de quatro barras no ambiente computacional, configurar os parâmetros das barras, linhas de transmissão,

gerador e carga, bem como inserir elementos de compensação utilizando o PowerWorld Simulator.

O estudante também desenvolverá habilidades na interpretação dos resultados obtidos pela simulação, analisando os valores de tensão e ângulo das barras do sistema antes e após a inserção do capacitor em série, relacionando as alterações observadas ao perfil de tensão e à capacidade de melhoria da estabilidade da rede elétrica. Espera-se ainda que realize os procedimentos de modelagem e análise de forma organizada e criteriosa, verificando a correta configuração do sistema, a consistência dos resultados computacionais e a influência dos dispositivos de compensação sobre o desempenho do sistema elétrico, desenvolvendo autonomia e rigor técnico na resolução de problemas relacionados aos sistemas elétricos de potência.

ROTEIRO DE AULA PRÁTICA

SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA AVANÇADOS

Unidade: Unidade 3 – Estabilidade no Sistema Elétrico de Potência.

Aula: Aula 12 - Estabilidade de Ângulo.

OBJETIVOS

Definição dos objetivos da aula prática:

- Montar o sistema elétrico de potência no PowerWorld Simulator a partir dos parâmetros fornecidos;
- Realizar a simulação do sistema elétrico considerando uma perturbação na rede;
- Inserir uma falta no sistema elétrico de potência e avaliar o comportamento dos elementos envolvidos;
- Analisar a resposta do sistema após a ocorrência da falta, verificando sua capacidade de permanecer em sincronismo;
- Relacionar os resultados obtidos na simulação aos conceitos de estabilidade de ângulo em sistemas elétricos de potência.

SOLUÇÃO DIGITAL:

PowerWorld Simulator (Software Livre/Educacional)

O PowerWorld Simulator é um software computacional interativo desenvolvido para a modelagem, simulação e análise de sistemas elétricos de potência, especialmente redes de alta tensão. A ferramenta permite representar graficamente os elementos que compõem um sistema elétrico, como barras, linhas de transmissão, transformadores, geradores e cargas, possibilitando a avaliação do comportamento operacional da rede.

O software é utilizado em estudos de fluxo de carga, análise de estabilidade, curto-circuito, contingências operacionais e demais aplicações relacionadas ao planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. Por meio de sua interface gráfica, permite acompanhar as condições de operação da rede em diferentes cenários, considerando variações de geração, demanda e configuração do sistema.

No contexto desta atividade, o PowerWorld Simulator será utilizado como ferramenta de apoio para a modelagem e análise do fluxo de carga, permitindo a visualização dos resultados obtidos e a interpretação do comportamento das grandezas elétricas do sistema estudado.

PROCEDIMENTOS PRÁTICOS E APLICAÇÕES

Procedimento/Atividade nº 1

Atividade proposta:

Aplicar os conhecimentos de Sistemas Elétricos de Potência Avançados para modelar um sistema elétrico no PowerWorld Simulator, realizar a simulação de uma perturbação no sistema e analisar a estabilidade de ângulo após a ocorrência de uma falta na rede elétrica.

Procedimentos para a realização da atividade:

1. INÍCIO DO PROJETO:

Abra o software PowerWorld Simulator para iniciar a modelagem do sistema elétrico. Na barra de ferramentas superior, selecione a opção "File" para acessar as opções de criação ou abertura de um projeto.

A Figura 1 demonstra o acesso ao menu "File" do PowerWorld Simulator, utilizado para iniciar um novo caso de estudo ou carregar uma configuração existente. A partir dessa opção, o usuário poderá criar o modelo do sistema elétrico, inserindo posteriormente os elementos da rede, como barras, geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 1 – Tela inicial do PowerWorld Simulator para criação de um novo projeto



Fonte: Autor

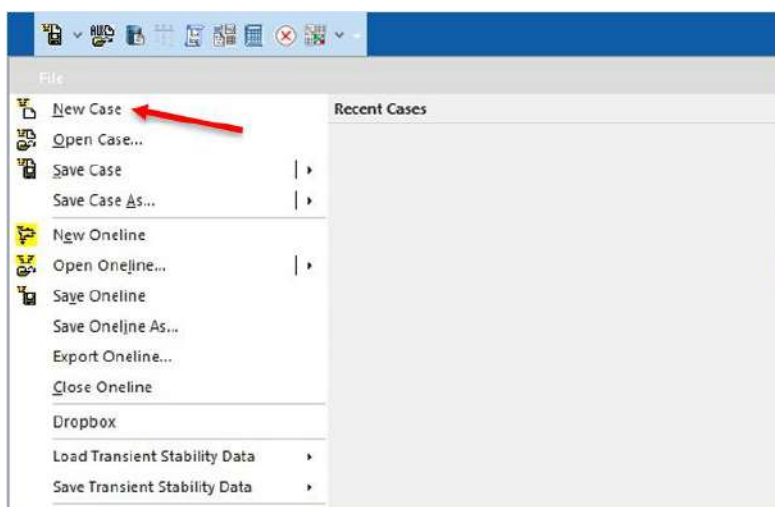
2. CONFIGURAÇÃO DA BASE:

Acesse o menu "File" e selecione a opção "New Case" para iniciar a criação de uma nova base de dados no PowerWorld Simulator. Ao executar esse comando, será aberta uma nova janela destinada à configuração inicial do caso de estudo, onde serão definidos os parâmetros básicos do sistema elétrico a ser modelado.

A Figura 2 apresenta o menu "File" do PowerWorld Simulator com a opção "New Case" selecionada. Essa função permite criar uma nova base de simulação, iniciando o processo de

modelagem do sistema elétrico de potência que será utilizado no estudo do fluxo de potência linearizado.

Figura 2 – Seleção da opção New Case para criação de uma nova base de estudo no PowerWorld Simulator



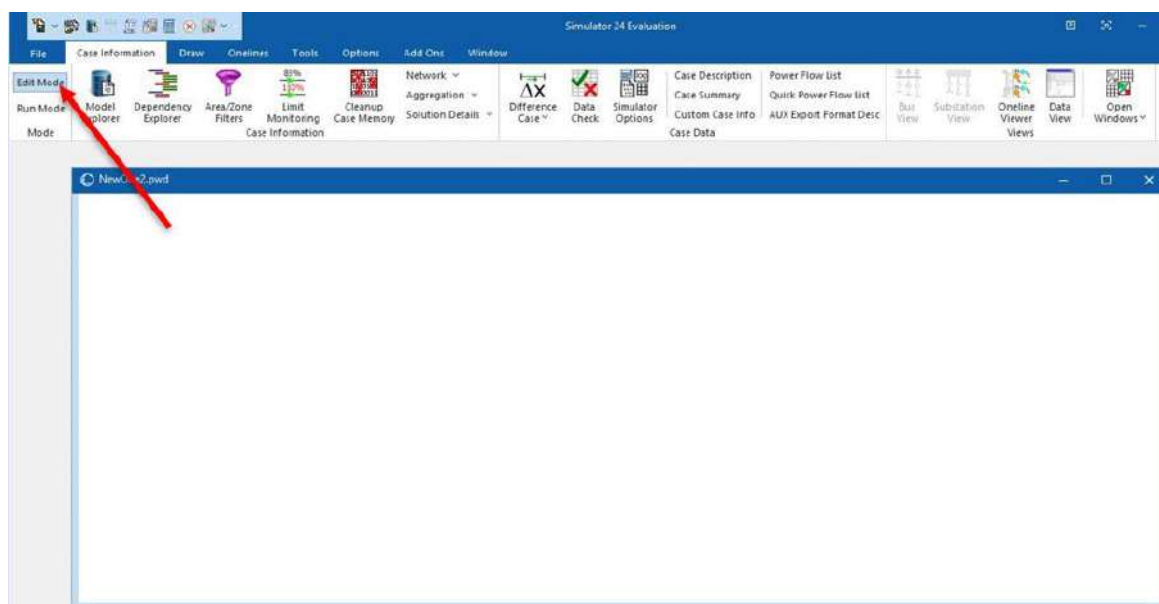
Fonte: Autor

3. CRIAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO:

Após a criação de um novo caso de estudo, será apresentada uma tela em branco no modo Edit Mode, ambiente destinado à construção e configuração do modelo do sistema elétrico. Nessa área serão inseridos os elementos da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, conforme as características do sistema a ser analisado.

A Figura X apresenta o ambiente de edição (Edit Mode) do PowerWorld Simulator após a criação de um novo caso. Essa área permite a inserção dos componentes elétricos e a montagem gráfica do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência linearizado.

Figura 3 – Área de edição para criação do modelo do sistema elétrico no PowerWorld Simulator

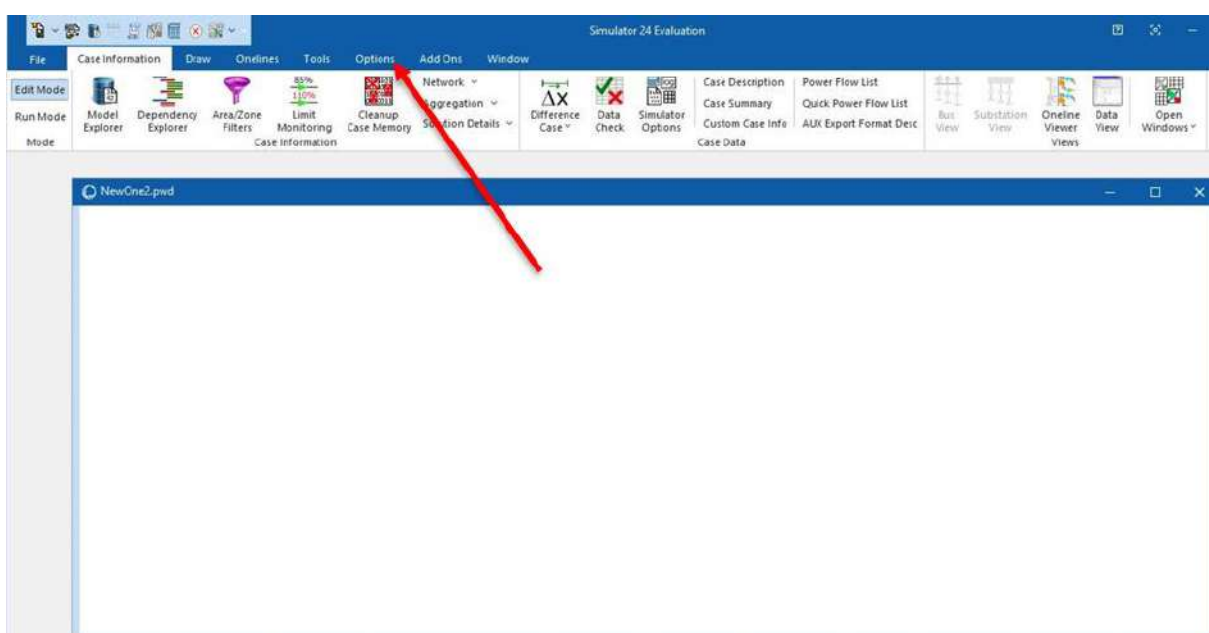


4. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Nesta etapa, deve-se definir a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico em por unidade (pu). Para realizar essa configuração, acesse o menu "Options" do PowerWorld Simulator e ajuste os parâmetros necessários conforme as características do sistema analisado.

A Figura 4 apresenta o menu "Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para acessar as configurações gerais da simulação. Nesta etapa, será definida a base de potência do sistema em valores por unidade (pu), parâmetro fundamental para a padronização dos cálculos elétricos.

Figura 4 – Acesso às configurações de base de potência no PowerWorld Simulator

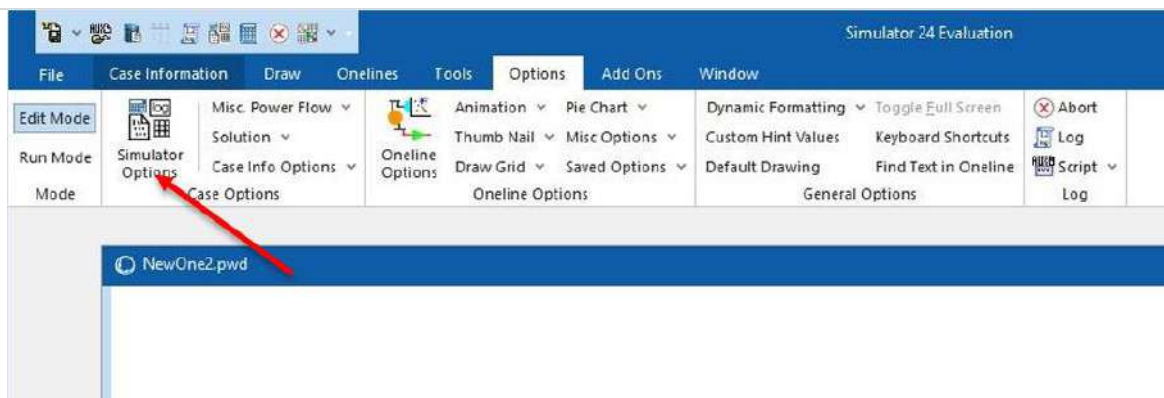


5. CONFIGURAÇÃO DAS OPÇÕES DO SIMULADOR:

Nesta etapa, acesse o menu "Simulator Options" do PowerWorld Simulator para abrir a janela de configurações do ambiente de simulação. Essas opções permitem ajustar parâmetros gerais utilizados na modelagem e execução dos estudos de fluxo de potência.

A Figura 5 apresenta o menu de acesso às opções de configuração do simulador (Simulator Options) no PowerWorld Simulator. Essa janela permite definir parâmetros gerais da simulação, que serão utilizados durante a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 5 – Acesso ao menu Simulator Options do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

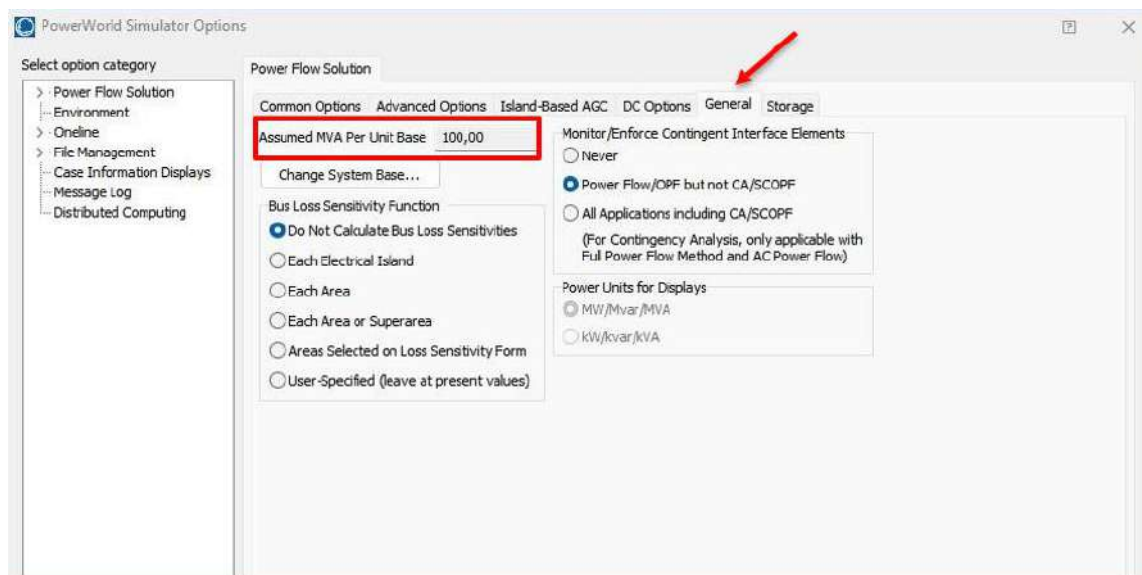
6. CONFIGURAÇÃO DA BASE DE POTÊNCIA DO SISTEMA:

Ao acessar o menu "Simulator Options", uma nova janela será aberta. Selecione a aba "General" e localize o campo "Assumed MVA Per Unit Base".

Nesse campo, informe o valor de 100,00 MVA, que será utilizado como base de potência do sistema para os cálculos realizados pelo simulador em valores por unidade (pu).

A Figura 6 apresenta a janela de configuração Simulator Options, na aba General, destacando o campo "Assumed MVA Per Unit Base", onde é definida a base de potência utilizada na representação do sistema elétrico. O valor de 100 MVA é uma referência usual em estudos de sistemas de potência e será empregado nos cálculos do fluxo de potência linearizado.

Figura 6 – Configuração da base de potência no PowerWorld Simulator



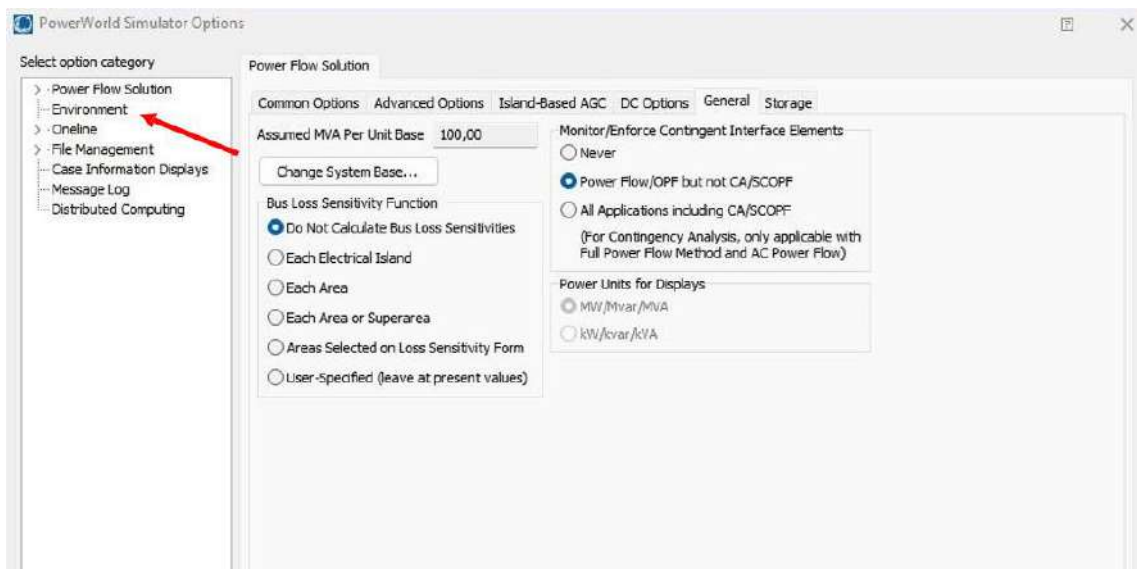
Fonte: Autor

7. CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Na mesma janela de configurações do Simulator Options, selecione a opção "Environment" para acessar os parâmetros relacionados ao ambiente de simulação do PowerWorld Simulator.

A Figura 7 apresenta a janela Simulator Options com a seleção da aba "Environment", utilizada para configurar parâmetros relacionados ao ambiente de execução da simulação. Essas configurações complementam a preparação do software para a modelagem e análise do sistema elétrico de potência.

Figura 7 – Acesso às configurações de ambiente do PowerWorld Simulator



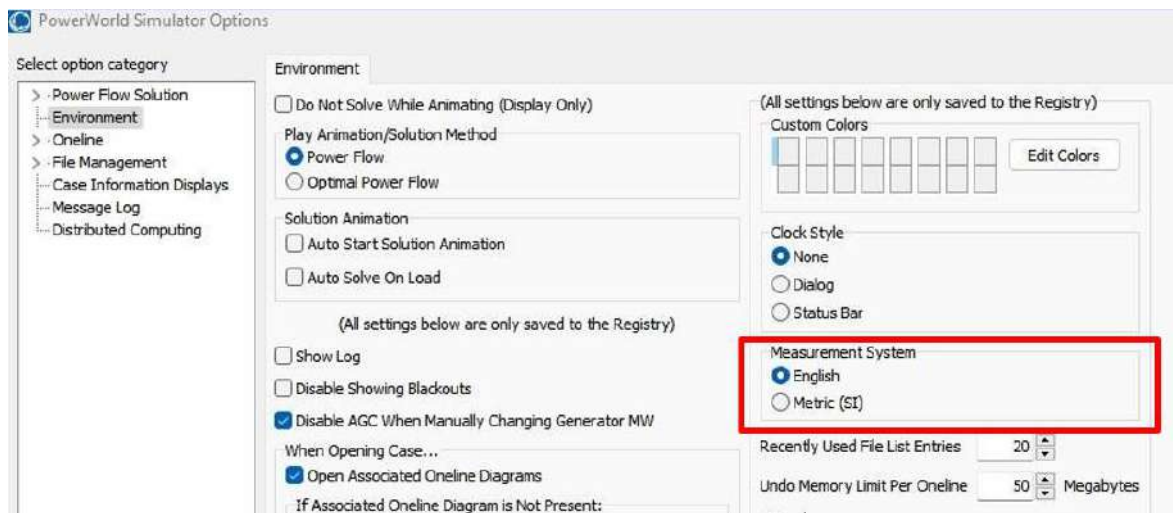
Fonte: Autor

8. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADES

Na aba "Environment", selecione a opção "Metric (SI)" para configurar o sistema de unidades utilizado pelo software. Após realizar a seleção, clique em "OK" para confirmar as alterações e aplicar as configurações definidas.

A Figura 8 apresenta a configuração do sistema de unidades na aba "Environment" do PowerWorld Simulator. A opção "Metric (SI)" define a utilização do Sistema Internacional de Unidades, padronizando a representação das grandezas elétricas e físicas utilizadas durante a modelagem e análise do sistema.

Figura 8 – Seleção do sistema de unidades Metric (SI) no PowerWorld Simulator

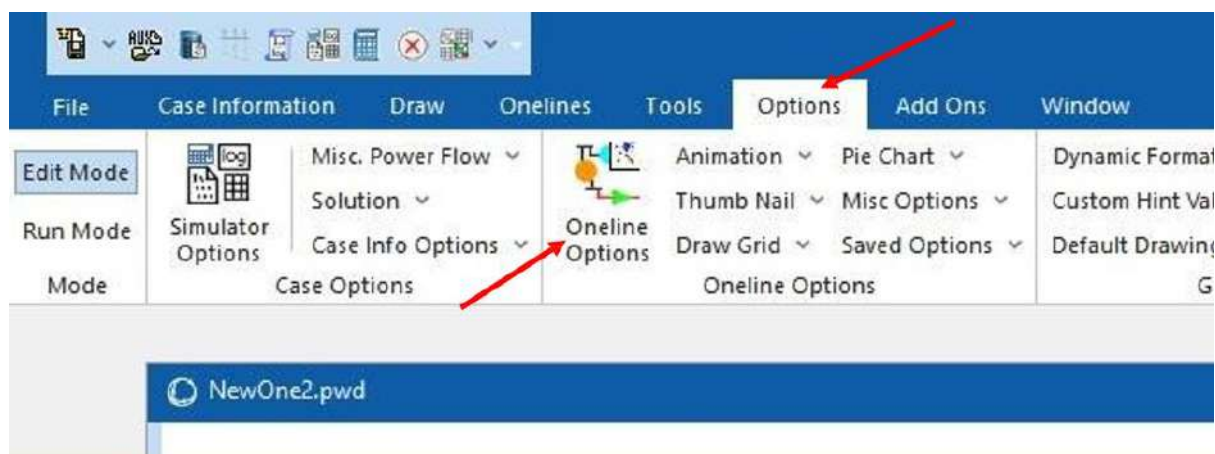


9. CONFIGURAÇÃO DO DIAGRAMA UNIFILAR

Clique novamente no menu "Options" e, em seguida, selecione a opção "Online Options" para acessar as configurações de visualização do diagrama unifilar do sistema elétrico.

A Figura 9 apresenta o acesso ao menu "Online Options" do PowerWorld Simulator, utilizado para configurar a forma de representação gráfica do sistema elétrico no diagrama unifilar. Essas opções permitem ajustar aspectos de visualização dos elementos da rede durante a montagem e análise do fluxo de potência.

Figura 9 – Acesso às configurações do diagrama unifilar no PowerWorld Simulator



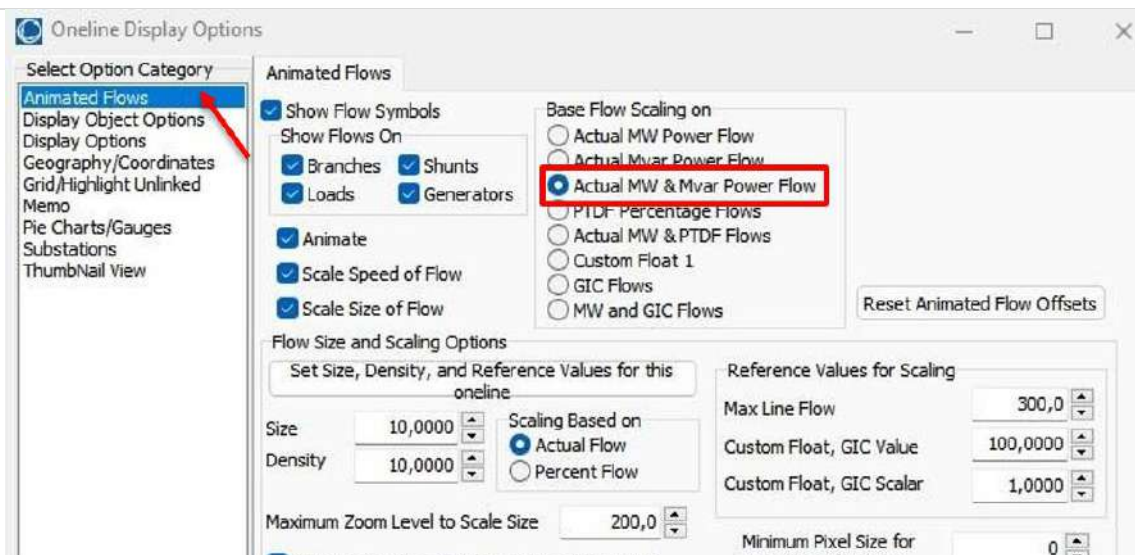
10. CONFIGURAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO DOS FLUXOS DE POTÊNCIA

Na janela "Online Options", selecione a opção "Animated Flows" para habilitar a visualização dinâmica dos fluxos no diagrama unifilar. Em seguida, marque as opções "Actual MW" e "Mvar Power Flow", permitindo a exibição dos fluxos de potência ativa e reativa no sistema.

Após realizar as configurações desejadas, clique em "Apply" para aplicar as alterações e, posteriormente, em "OK" para confirmar as configurações.

A Figura 10 apresenta a janela "Online Options", na qual são configuradas as opções de visualização dos fluxos de potência no diagrama unifilar. A seleção de "Animated Flows", "Actual MW" e "Mvar Power Flow" permite acompanhar graficamente a transferência de potência ativa e reativa entre os elementos do sistema elétrico.

Figura 10 – Configuração da visualização dos fluxos de potência no PowerWorld Simulator



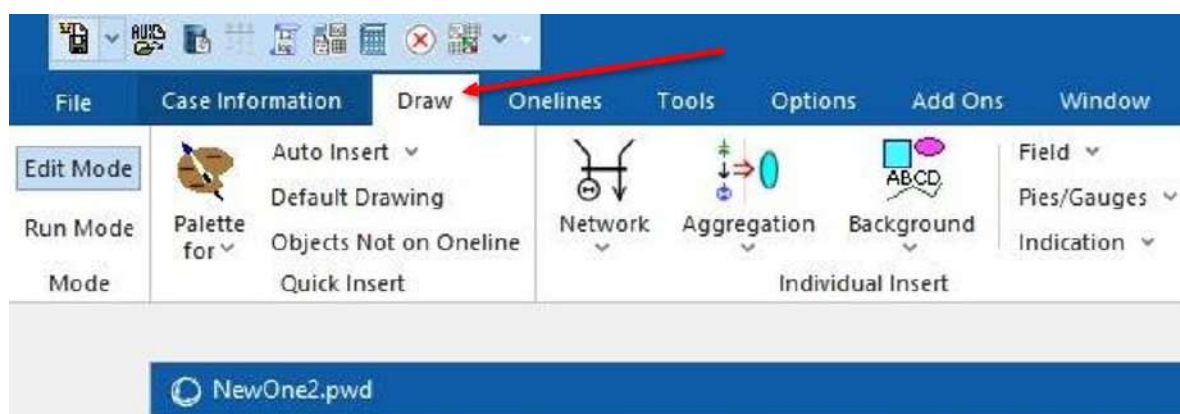
Fonte: Autor

11. MONTAGEM DO DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA

Nesta etapa, inicia-se a representação gráfica do sistema elétrico a ser simulado. Para isso, acesse o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, que disponibiliza as ferramentas necessárias para inserção e organização dos elementos da rede elétrica.

A Figura 11 apresenta o menu "Draw" do PowerWorld Simulator, utilizado para realizar a montagem gráfica do sistema elétrico. Por meio dessas ferramentas, é possível inserir os componentes da rede, como barras, linhas de transmissão, geradores e cargas, formando o diagrama unifilar utilizado na simulação.

Figura 11 – Acesso às ferramentas de desenho do sistema no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

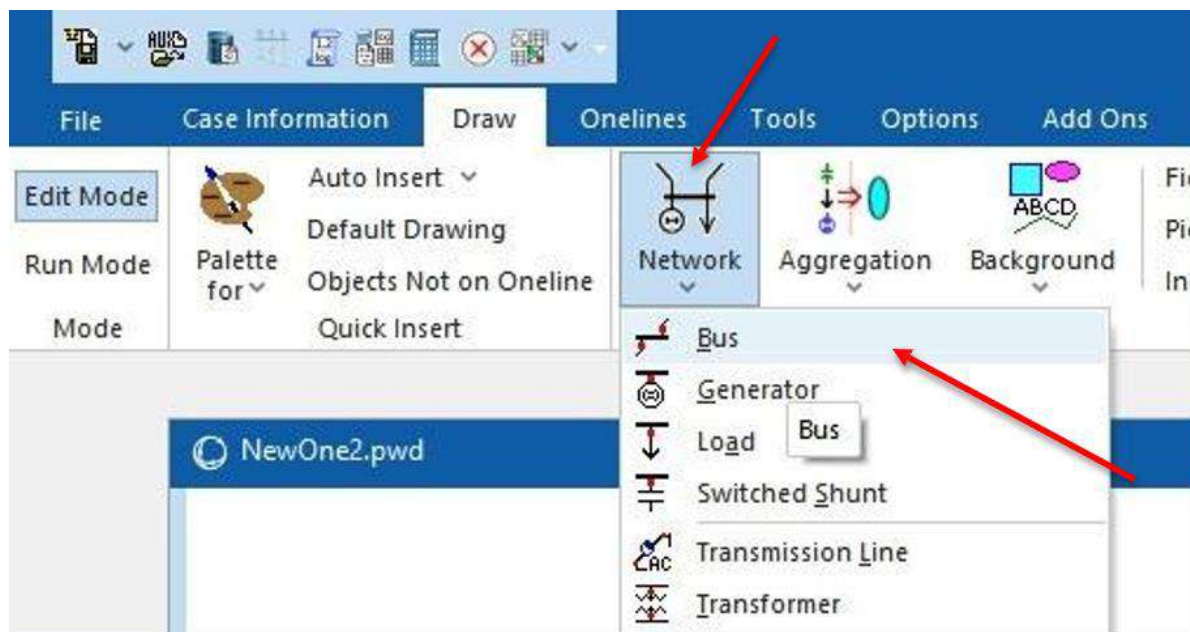
12. INSERÇÃO DA BARRA DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesta etapa, inicia-se a construção do sistema elétrico por meio da inserção das barras que representam os nós da rede. Para adicionar uma barra ao diagrama unifilar, acesse o menu "Network" e selecione a opção "Bus".

Após a seleção, a barra poderá ser posicionada no ambiente de edição do PowerWorld Simulator, dando início à montagem do sistema que será utilizado na análise do fluxo de potência.

A Figura 12 apresenta o procedimento de inserção de uma barra (Bus) no ambiente de modelagem do PowerWorld Simulator. As barras representam os pontos de conexão do sistema elétrico, onde são associados elementos como geradores, cargas e linhas de transmissão.

Figura 12 – Inserção de uma barra no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

13. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA BARRA

Após inserir a barra no diagrama unifilar, clique sobre a área de edição para abrir a janela de configuração do elemento. Nesta etapa, devem ser definidos os parâmetros elétricos da barra conforme as características do sistema analisado.

Configure a tensão nominal da barra para 138 kV e ajuste os demais campos conforme os valores apresentados na tela de parâmetros.

A Figura 13 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de uma barra no PowerWorld Simulator. Nessa etapa são definidos dados elétricos importantes, como a tensão nominal do barramento, que neste estudo será considerada igual a 138 kV, além de outros parâmetros necessários para a modelagem do sistema elétrico.

Figura 13 – Janela de configuração dos parâmetros da barra no PowerWorld Simulator

Bus Options

Bus Number: 1
 Bus Name: 1
 Nominal Voltage: 138,0000 kV
 Labels ...: no labels

Find By Number
 Find By Name
 Find ...

	Number	Name
Area	1	1
Balancing Authority	1	1
Zone	1	1
Owner	1	1
Substation		
Data Maintainer		

View Area Dialog
 View Zone Dialog
 View Owner Dialog
 View Substation Dialog

Bus Information | Limits | Display | Attached Devices | Geography | Custom | Stability

Orientation: ☐ Right ☒ Up ☐ Left ☐ Down
 Shape: ☒ Rectangle ☐ Ellipse
 Size: 5,00
 Width: 0,300
 Scale Width with Size: ☐
 Link to New Bus

☐ Allow to Act as a Fixed Number Bus (impacts auto insertion routines)

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

14. CONFIGURAÇÃO DA BARRA DE REFERÊNCIA (SLACK BUS)

Na janela de configuração da barra, acesse a opção "Bus Information" para realizar a definição do tipo de barra no sistema elétrico. Selecione a caixa "System Slack Bus" e confirme a alteração clicando em "OK".

A barra configurada como Slack Bus será utilizada como referência angular do sistema, sendo responsável pelo balanço entre a geração e o consumo de potência durante a solução do fluxo de potência.

A Figura 14 apresenta a janela "Bus Information", destacando a opção "System Slack Bus", utilizada para definir a barra de referência do sistema elétrico. Essa configuração estabelece a barra responsável por fornecer a referência de ângulo de tensão e pelo ajuste do balanço de potência durante os cálculos do fluxo de carga.

Figura 14 – Configuração da barra de referência (System Slack Bus) no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number 1 Find By Number

Bus Name 1 Find By Name

Nominal Voltage 138,00 kV Find ...

Labels ...

	Number	Name	
Area	Change 1	1	View Area Dialog
Balancing Authority	Change 1	1	View Zone Dialog
Zone	Change 1	1	View Owner Dialog
Owner	Change 1		View Substation Dialog
Substation	Change		
Data Maintainer	Change		

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.) 1,00

Angle (degrees) 0,00

Bus Voltage Regulator Devices

☒ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

15. INSERÇÃO DAS DEMAIS BARRAS DO SISTEMA

Após a criação da barra de referência, devem ser inseridas as demais barras que irão compor o sistema elétrico analisado. Crie as Barras 2, 3 e 4, todas com tensão nominal de 138 kV.

Durante a configuração dessas barras, não selecione a opção "System Slack Bus", pois somente a barra de referência definida anteriormente deve exercer essa função no sistema. Após realizar as configurações, clique em "OK" para confirmar a inserção dos elementos.

Figura 15 – Configuração das demais barras do sistema no PowerWorld Simulator

ons Add Ons Window

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number 1 Find By Number

Bus Name 1 Find By Name

Nominal Voltage 138,00 kV Find ...

Labels ...

	Number	Name
Area	1	1
Balancing Authority	1	1
Zone	1	1
Owner	1	
Substation		
Data Maintainer		

View Area Dialog

View Zone Dialog

View Owner Dialog

View Substation Dialog

Bus Information Display Attached Devices Geography Custom Stability

Bus Voltage

Voltage (p.u.) 1,00

Angle (degrees) 0,00

Bus Voltage Regulator Devices

☐ System Slack Bus

OK Save Save to Aux Cancel

Fonte: Autor

Observação:

Apenas uma barra do sistema elétrico deve ser definida como System Slack Bus, sendo esta responsável pela referência angular do sistema e pelo balanço de potência ativa e reativa durante os estudos de fluxo de potência. As demais barras devem permanecer sem essa seleção, conforme configurado na Figura 15.

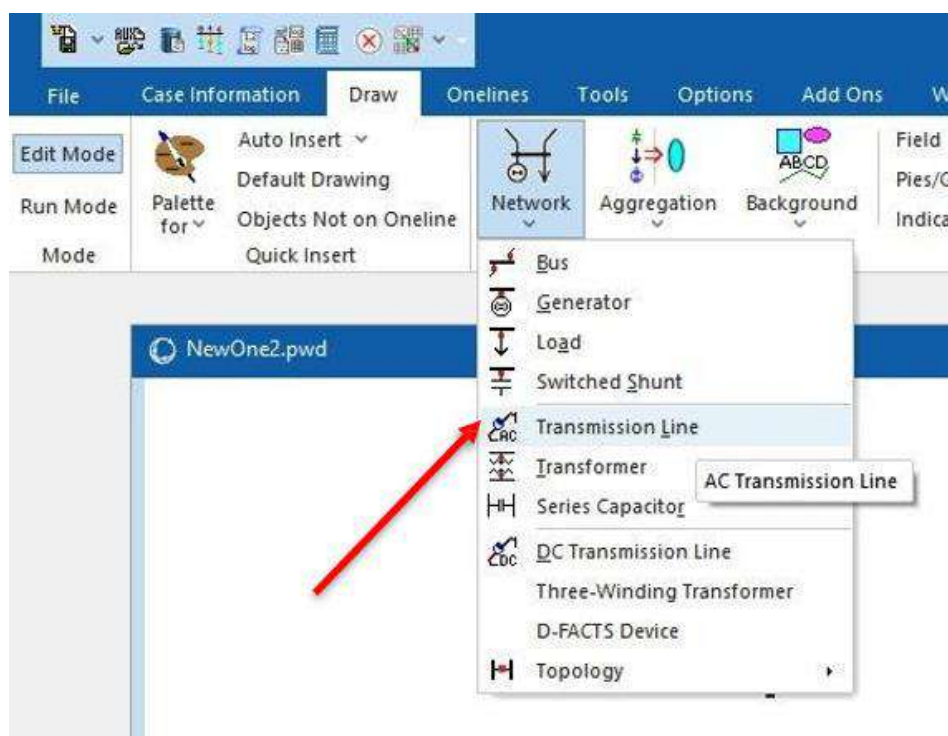
16. INSERÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Nesta etapa, deve-se realizar a interligação entre as barras do sistema elétrico por meio da inserção de uma linha de transmissão. Para isso, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Transmission Line".

Após selecionar o elemento, conecte a linha de transmissão entre as barras previamente criadas, estabelecendo a conexão necessária para a análise do fluxo de potência.

A Figura 16 apresenta o procedimento de inserção de uma linha de transmissão no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Esse elemento representa o ramo elétrico responsável pela conexão entre as barras do sistema, permitindo o fluxo de potência entre os nós da rede.

Figura 16 – Inserção da linha de transmissão entre as barras no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

17. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Após selecionar o elemento "Transmission Line", realize a conexão entre as barras do sistema conforme a sequência indicada na atividade. Inicialmente, clique sobre a Barra 1 e arraste até a Barra 2, realizando dois cliques para finalizar a inserção da linha de transmissão.

Ao concluir a ligação, será aberta uma janela de configuração dos parâmetros do elemento. Informe a resistência (R) da linha como 0,1 pu e a reatância (X) como 0,1 pu. Após inserir os valores, clique em "OK" para confirmar as configurações.

Repita o mesmo procedimento para inserir as demais linhas de transmissão do sistema, realizando as conexões entre as Barras 2 e 3 e entre as Barras 3 e 4, mantendo os mesmos valores de resistência e reatância para todos os elementos.

A Figura 17 apresenta a configuração da linha de transmissão inserida entre as barras do sistema. Nesta etapa são definidos os parâmetros elétricos dos elementos de transmissão, que serão utilizados pelo PowerWorld Simulator nos cálculos de fluxo de potência e na posterior montagem da matriz de admitância nodal (Y_{bus}).

Figura 17 – Configuração dos parâmetros elétricos da linha de transmissão

Branch Options

From Bus: 2 To Bus: 3 Circuit: 1

Number: 2 Name: 2 Area Name: 1 (1) Nominal kV: 138,0

Find By Numbers Find By Names Find ...

☒ From End Metered ☒ Default Owner (Same as From Bus)

Labels ...

Display Custom Parameters Transformer Control Stability Series Capacitor Fault Info Geography

Status: ☐ Open ☒ Closed

Branch Device Type: Line

☒ Allow Consolidation

Length: 0,00

Calculate Impedances >

Normal Status: ☐ Open ☒ Closed

Per Unit Impedance Parameters

Series Resistance (R)	0,1
Series Reactance (X)	0,1
Shunt Charging (B)	0,000000
Shunt Conductance (G)	0,000000

☐ Has Line Shunts Line Shunts

MVA Limits

Limit A	0.000
Limit B	0.000
Limit C	0.000
Limit D	0.000
Limit E	0.000
Limit F	0.000
Limit G	0.000
Limit H	0.000
Limit I	0.000
Limit J	0.000
Limit K	0.000

Convert Line to Transformer Exchange From and To Buses

D-FACTS Devices on the Line ☐ Has D-FACTS

OK Save Save to Aux Cancel Help

Fonte: Autor

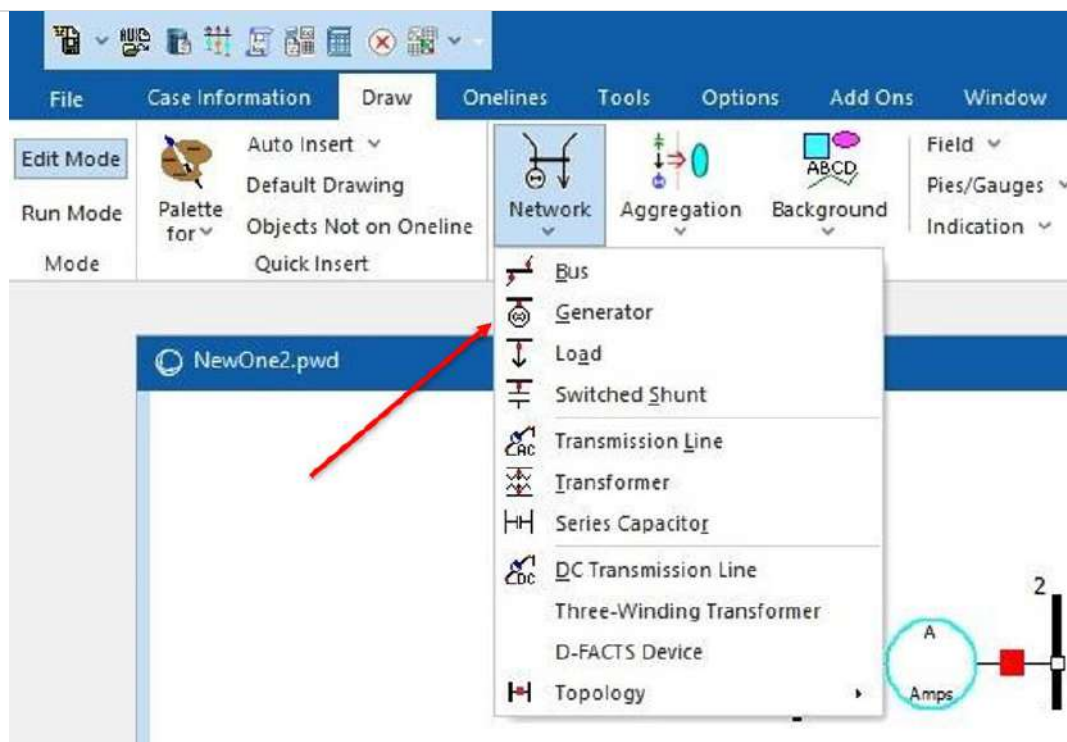
18. INSERÇÃO DOS GERADORES NAS BARRAS DO SISTEMA

Nesta etapa, devem ser inseridos os elementos de geração responsáveis pelo fornecimento de potência ao sistema elétrico. Para adicionar um gerador no diagrama unifilar, acesse o menu "Draw", selecione a opção "Network" e, em seguida, clique em "Generator".

Após selecionar o elemento, posicione os geradores nas Barras 1 e 2, conforme a configuração proposta para o sistema analisado.

A Figura 18 apresenta o procedimento de inserção dos geradores no diagrama unifilar do PowerWorld Simulator. Os geradores representam as fontes de potência ativa e reativa do sistema, sendo elementos fundamentais para a análise do fluxo de potência.

Figura 18 – Inserção dos geradores no sistema elétrico utilizando o PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

19. CONFIGURAÇÃO DO GERADOR NA BARRA 1

Após inserir o gerador no sistema, clique sobre a Barra 1 para abrir a janela de configuração do elemento de geração. No campo "MV Setpoint", informe o valor 0 e, em seguida, clique em "OK" para confirmar a configuração.

Essa definição estabelece o valor inicial de geração ativa associado ao gerador conectado à Barra 1, conforme os parâmetros propostos para a simulação.

A Figura 19 apresenta a janela de configuração do gerador associado à Barra 1 no PowerWorld Simulator. O campo "MW Setpoint" (potência ativa de referência do gerador) é configurado com valor igual a 0 MW, conforme definido para o modelo analisado.

Figura 19 – Configuração do gerador conectado à Barra 1

Generator Options

Bus Number: 1 | Find By Number | Find ... | Status: ☐ Open ☒ Closed | Generator MVA Base: 100,00

ID: 1 | Find ... | Find By Name

Bus Name: 1 | Fuel Type: UN (Unknown) | [PW=0] [EPC=0] | Unit Type:

Area Name: 1 | Labels ...

Display Information | **Power and Voltage Control** | Costs | Fault Parameters | Owners, Area, etc | Custom

Power Control

MW Setpoint: 0 | MW Output: 0,000 | Part. Factor: 10,00

Min. MW Output: 0,000 | ☒ Available for AGC

Max. MW Output: 1000,000 | ☒ Enforce MW Limits during automatic control

Voltage Control

Mvar Output: 0,000 | ☒ Available for AVR | Regulated Bus Number: 1

Min Mvars: -9900,000 | ☐ Use Capability Curve | SetPoint Voltage: 1,000000

Max Mvars: 9900,000 | SetPoint Voltage Tol: 0,000000

Mvar Capability Curve

	MW	Min Mvar	Max Mvar
1			
2			
3			
4			
5			

Remote RegFactor: 100,0

Line Drop Compensation

Use LDC: No | Xcomp: 0,000100 | Rcomp: 0,000000

Wind Control Mode

Mode: None | Power Factor: 1,0000

Voltage Droop Control

Name: | Find... | Clear | Add...

OK | Save | Save to Aux | Cancel | Help

Fonte: Autor

20. AJUSTE DA ORIENTAÇÃO DO GERADOR

Caso seja necessário alterar a posição ou orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar, clique duas vezes sobre o elemento de geração para acessar suas propriedades gráficas.

Realize o ajuste do campo de orientação conforme a disposição desejada no modelo do sistema e confirme a alteração.

A Figura 20 apresenta a janela de configuração utilizada para ajustar a orientação do símbolo do gerador no diagrama unifilar. Essa alteração tem finalidade visual, permitindo organizar a representação gráfica do sistema elétrico de forma adequada.

Figura 20 – Ajuste da orientação gráfica do gerador no PowerWorld Simulator

Fonte: Autor

21. CONEXÃO DO GERADOR À BARRA DO SISTEMA

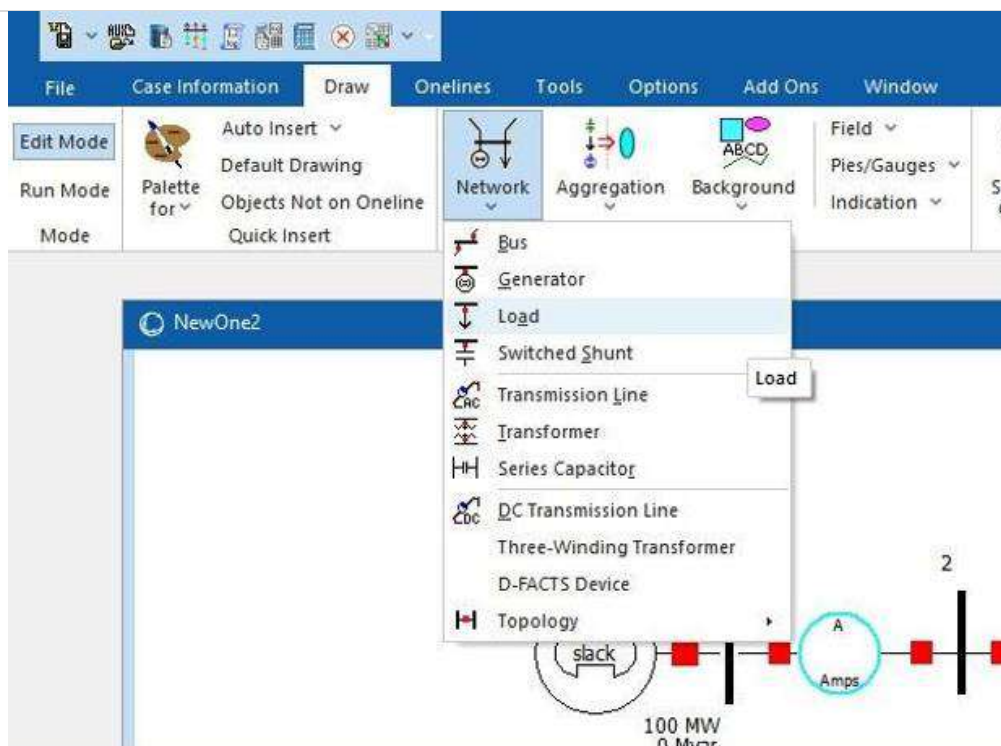
Após configurar o gerador, realize a conexão do elemento de geração à Barra 1 do sistema elétrico. Certifique-se de que o gerador esteja corretamente associado à barra, garantindo sua integração ao modelo da rede para a realização dos estudos de fluxo de potência e da montagem da matriz de admitância nodal (Ybus).

22. INSERÇÃO DA CARGA NA BARRA 4

Após concluir a conexão do gerador ao sistema, insira uma carga na Barra 4. Para isso, acesse o menu Network e selecione a opção Load.

Em seguida, clique sobre a Barra 4 para inserir o elemento de carga no sistema elétrico. Ao realizar a inserção, será aberta a janela de configuração da carga, na qual serão definidos os parâmetros elétricos do elemento nas etapas seguintes.

Figura 21 – Inserção de uma carga na Barra 4 utilizando o PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

23. CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARGA

Após inserir a carga na Barra 4, clique sobre ela para abrir a janela de configuração de seus parâmetros elétricos.

Na janela apresentada, informe a potência ativa (P) como 50 MW e a potência reativa (Q) como 10 MVar. Após inserir os valores, clique em "OK" para confirmar a configuração da carga.

A Figura 22 - Configuração da carga no PowerWorld Simulator, destacando os campos utilizados para a definição das potências ativa e reativa do elemento.

Load Options

Bus Number: 4
 ID: 1
 Bus Name: 4
 Labels: ...

Find By Number: Find ...
 Find By Name: Find ...

Status:
☐ Open
☒ Closed

Area: Change 1 1
 Zone: Change 1 1
 Substation:
 Owner: Change 1 1
☒ Same Owner as Terminal Bus

Data Maintainer:
 Load Information: OPF Load Dispatch Custom

Constant Power Constant Current Constant Impedance

MW Value: 50,000
 Mvar Value: 10,000

Distributed Generation:
☐ Open ☒ Closed
 MW: 0,000 Min MW: 0,000
 Mvar: 0,000 Max MW: 0,000

Display Information:
 Display Size: 10,00
☒ Scale Width with Size
 Display Width: 3,75
 Pixel Thickness: 1
 Orientation:
☐ Right ☐ Left
☒ Up ☐ Down
☒ Anchored
 Link To New Load

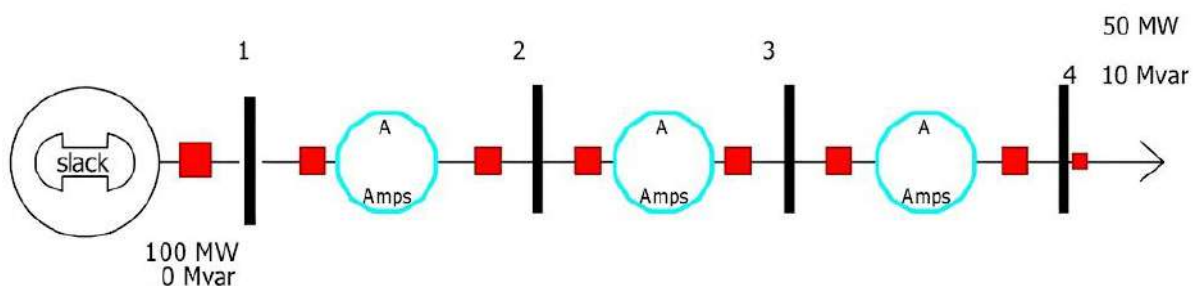
OK Save Save to Aux Cancel Help

Fonte: Autor

24. VERIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DA CARGA

Após concluir a configuração dos parâmetros da carga, verifique se os valores informados correspondem aos especificados na atividade. A carga conectada à Barra 4 deve apresentar potência ativa de 50 MW e potência reativa de 10 MVar, conforme definido na etapa anterior.

A Figura 23 - Configuração final da carga no PowerWorld Simulator, servindo como referência para conferência dos parâmetros antes da execução das análises do sistema elétrico.



Fonte: Autor

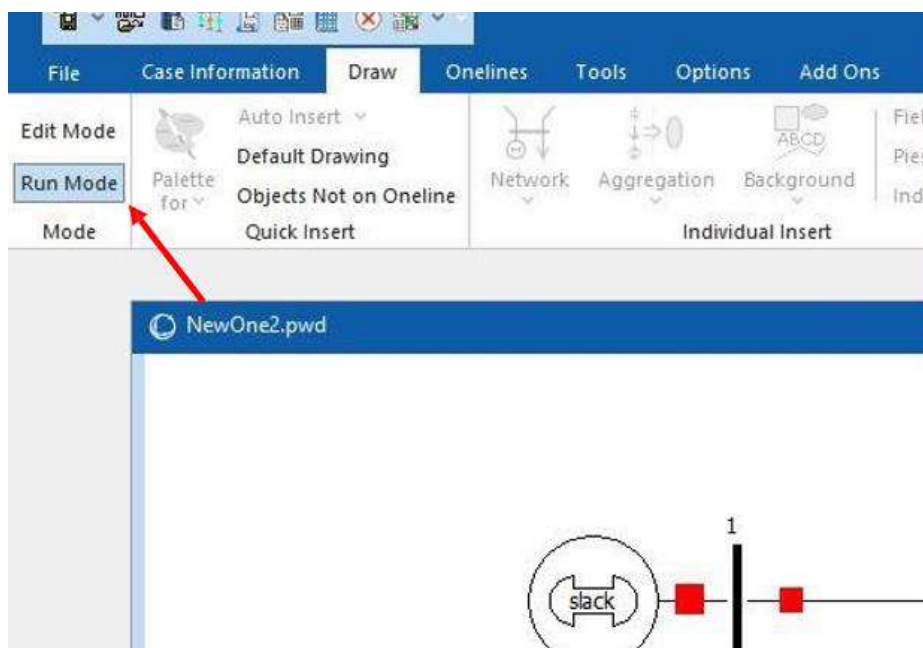
25. EXECUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Após concluir a montagem e configuração do sistema elétrico, deve-se executar o cálculo do fluxo de potência. Para iniciar a simulação, altere o ambiente do PowerWorld Simulator para o modo de execução ("Run Mode").

Essa etapa permite que o software realize os cálculos elétricos da rede, determinando os fluxos de potência e as condições operacionais do sistema modelado.

A Figura 24 apresenta a seleção do modo "Run Mode" no PowerWorld Simulator, utilizado para executar a simulação do sistema elétrico após a etapa de modelagem. Nesse modo, o software realiza os cálculos do fluxo de potência e permite a análise dos resultados obtidos.

Figura 24 – Seleção do modo Run Mode no PowerWorld Simulator



Fonte: Autor

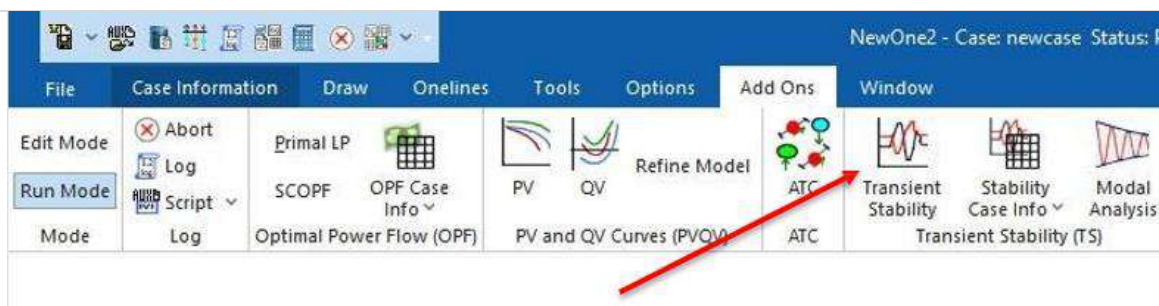
26. ACESSO À FERRAMENTA DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Para iniciar a análise da estabilidade de ângulo do sistema elétrico, acesse a ferramenta de simulação de estabilidade transitória do PowerWorld Simulator. No menu principal, selecione a opção Transient Stability, responsável pela realização de estudos dinâmicos envolvendo perturbações no sistema e avaliação do comportamento dos geradores.

Essa ferramenta permite analisar a resposta do sistema elétrico após a ocorrência de eventos como faltas, desligamentos de elementos da rede ou outras perturbações, verificando a capacidade dos geradores permanecerem em sincronismo.

A Figura 25 apresenta o acesso à ferramenta Transient Stability no PowerWorld Simulator, utilizada para configuração e execução das simulações de estabilidade angular do sistema elétrico.

Figura 25 – Acesso à ferramenta Transient Stability no PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

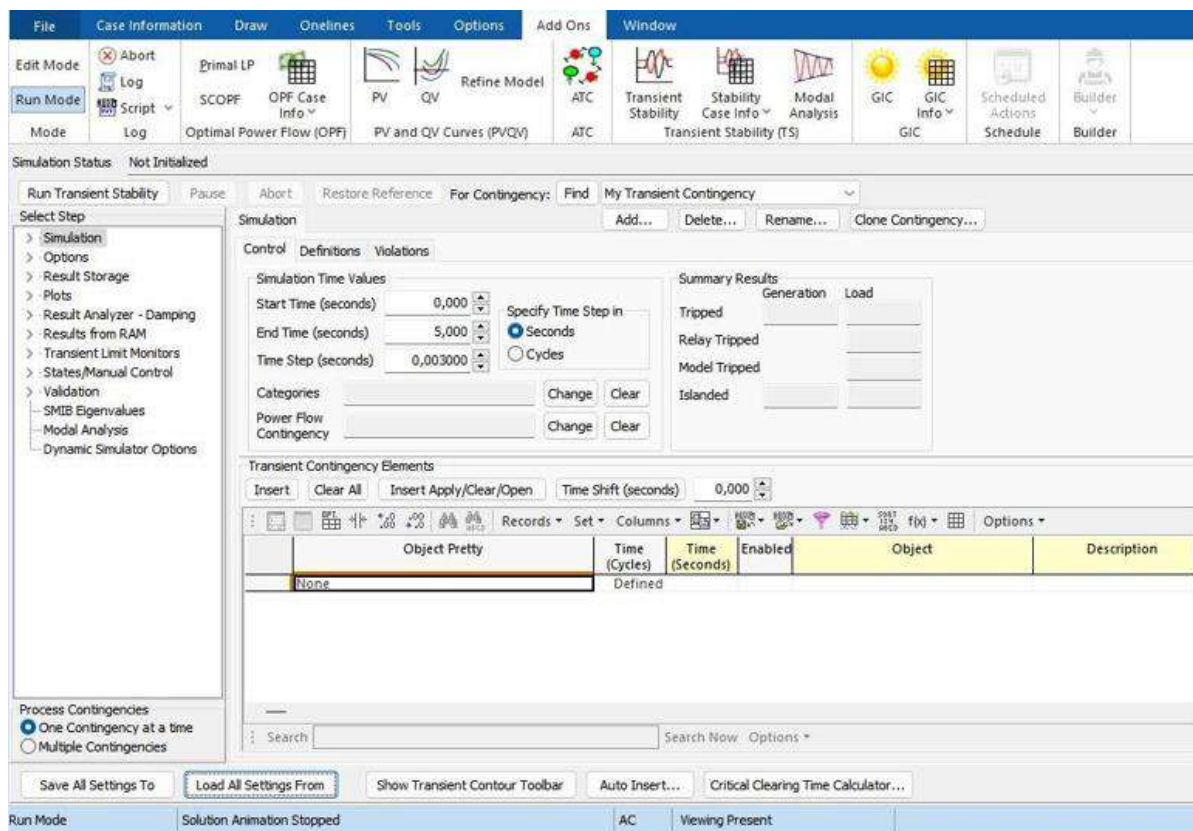
27. VISUALIZAÇÃO DA JANELA DE CONFIGURAÇÃO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Após acessar a ferramenta Transient Stability, será aberta a janela de configuração utilizada para definir os parâmetros da simulação dinâmica do sistema elétrico.

Nesta etapa, o usuário poderá visualizar as opções disponíveis para configuração dos eventos, condições de operação e demais parâmetros necessários para a realização do estudo de estabilidade de ângulo. A partir dessa janela serão definidos os dados utilizados para analisar o comportamento do sistema após a ocorrência de uma perturbação.

A Figura 26 apresenta a janela inicial de configuração da análise de estabilidade transitória no PowerWorld Simulator, utilizada para preparação da simulação de estabilidade de ângulo.

Figura 26 – Janela de configuração da estabilidade transitória no PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

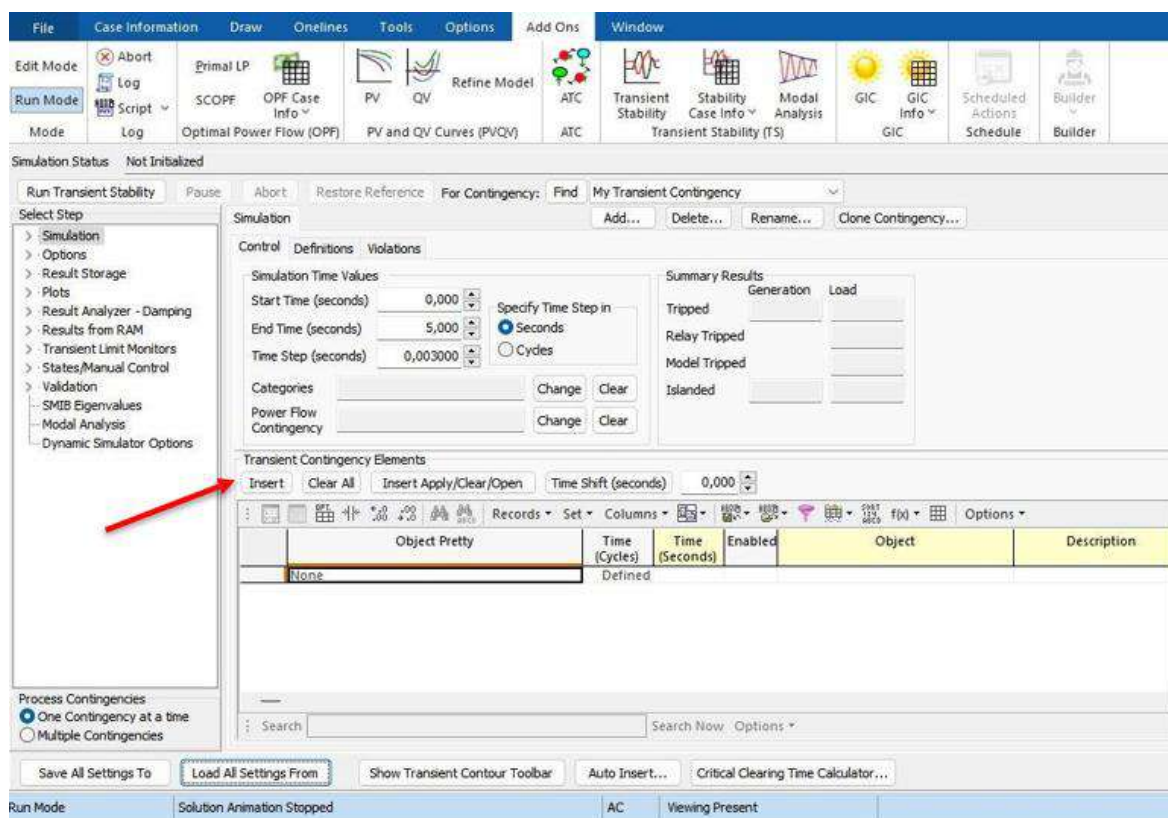
28. INSERÇÃO DE UM NOVO EVENTO NA SIMULAÇÃO DE ESTABILIDADE

Na janela de configuração da estabilidade transitória, clique na opção Insert para adicionar um novo evento à simulação.

A inserção de eventos permite configurar as perturbações que serão aplicadas ao sistema elétrico durante o estudo de estabilidade de ângulo. Esses eventos representam situações anormais de operação, como faltas ou alterações na configuração da rede, possibilitando avaliar a resposta dinâmica do sistema após a ocorrência da perturbação.

A Figura 27 apresenta a opção Insert na janela de configuração da estabilidade transitória do PowerWorld Simulator, utilizada para adicionar eventos à simulação.

Figura 27 – Inserção de evento na ferramenta Transient Stability do PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

29. CONFIGURAÇÃO DA FALTA NA BARRA 3

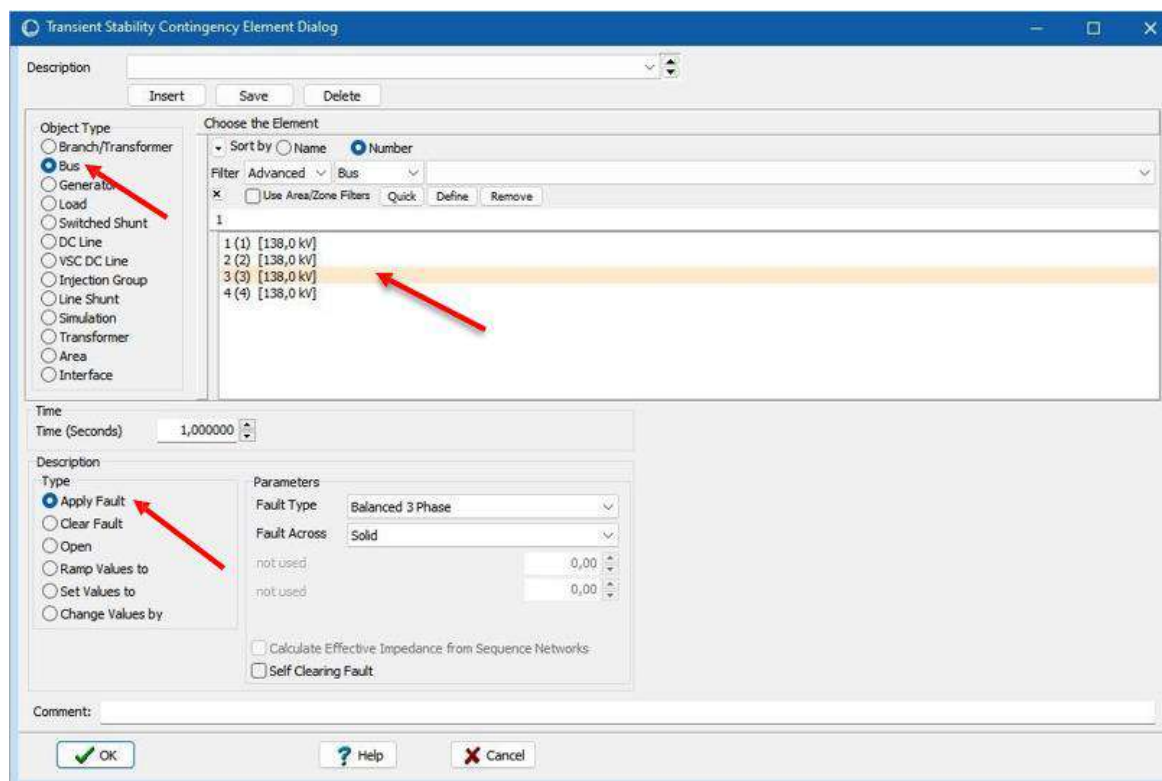
Após clicar na opção Insert, será aberta uma nova janela de configuração do evento de estabilidade transitória. Nesta janela, selecione a opção Bus para definir que a perturbação será aplicada em uma barra do sistema elétrico.

Em seguida, selecione a Barra 3 como o local de aplicação da falta, marque a opção Apply Fault para inserir a ocorrência de uma falta no sistema e clique em "OK" para confirmar a configuração do evento.

A aplicação da falta na Barra 3 permitirá avaliar o comportamento dinâmico do sistema elétrico após uma perturbação, verificando a capacidade dos geradores de permanecerem em sincronismo e a estabilidade angular da rede.

A Figura 28 apresenta a janela de configuração do evento de falta no PowerWorld Simulator, destacando a seleção da Barra 3 e a opção de aplicação da perturbação.

Figura 28 – Configuração da falta aplicada na Barra 3 no PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

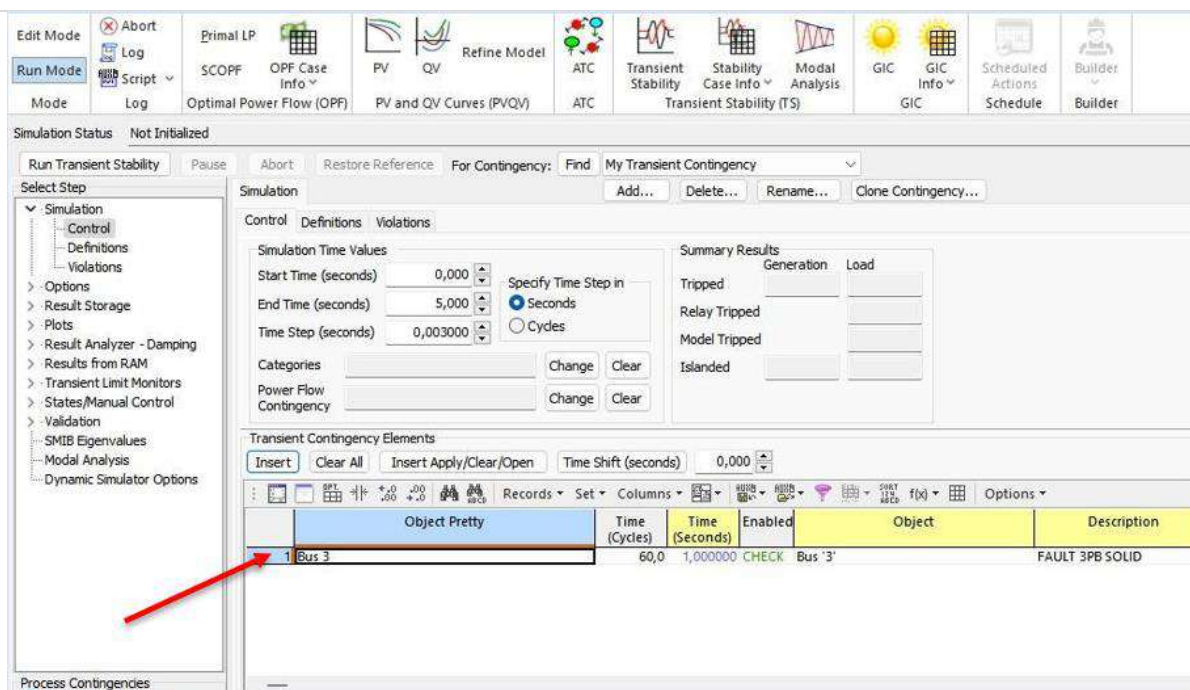
30. VISUALIZAÇÃO DO EVENTO DE FALTA CONFIGURADO

Após confirmar a configuração do evento clicando em "OK", o evento de falta inserido será apresentado na janela de configuração da estabilidade transitória.

Nesta etapa, é possível verificar que a perturbação foi adicionada corretamente ao estudo, indicando a aplicação da falta na Barra 3. Essa configuração será utilizada posteriormente durante a execução da simulação dinâmica para avaliar o comportamento do sistema elétrico após a ocorrência do distúrbio.

A Figura 29 apresenta o evento de falta configurado na ferramenta Transient Stability do PowerWorld Simulator, mostrando a inserção da perturbação que será aplicada ao sistema durante a análise de estabilidade de ângulo.

Figura 29 – Evento de falta configurado na ferramenta Transient Stability do PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

31. CONFIGURAÇÃO DA REMOÇÃO DA FALTA NO SISTEMA

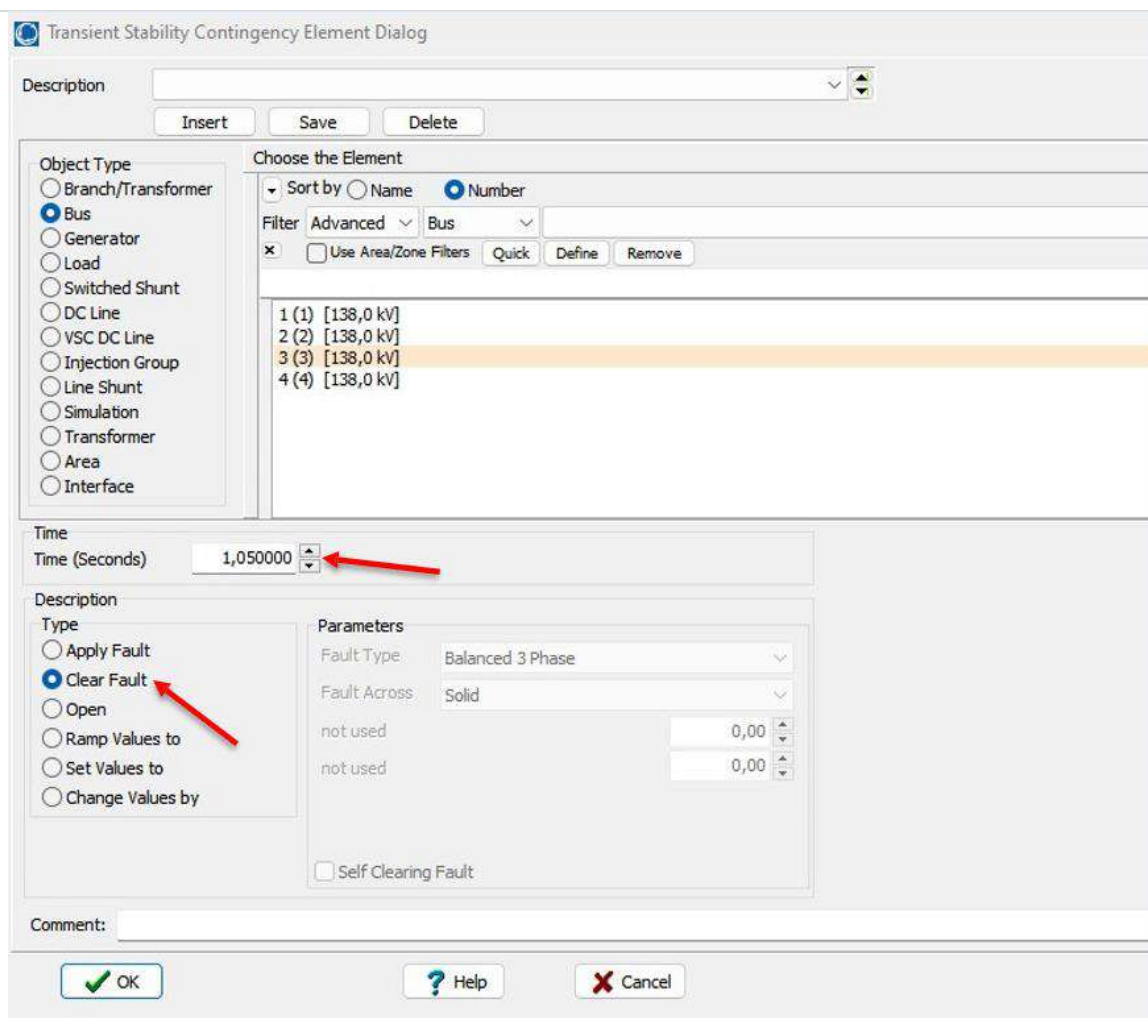
Após a inserção da falta na Barra 3, deve-se configurar o momento em que a perturbação será eliminada, permitindo avaliar a capacidade do sistema de retornar a uma condição de operação estável após o distúrbio.

Para isso, clique novamente na opção Insert na janela de configuração da estabilidade transitória. Na nova configuração de evento, informe o tempo de ocorrência da remoção da falta (Time) como 1,05 s e selecione a opção Clear Fault para eliminar a perturbação aplicada anteriormente.

Após realizar essa configuração, clique em "OK" para confirmar a inserção do evento. A sequência formada pela aplicação e eliminação da falta representa uma condição típica de estudo de estabilidade transitória, permitindo analisar a resposta angular do sistema após uma perturbação.

A Figura 30 apresenta a configuração do evento de eliminação da falta na ferramenta Transient Stability do PowerWorld Simulator, indicando o instante em que a perturbação aplicada na Barra 3 será removida.

Figura 30 – Configuração da remoção da falta no PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

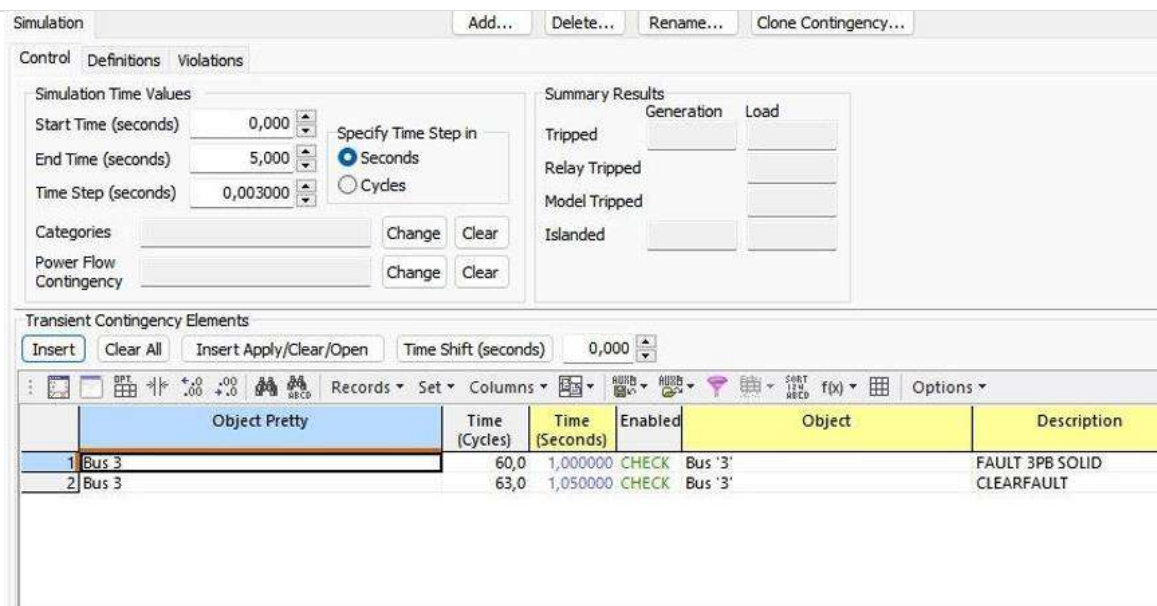
32. VERIFICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE EVENTOS CONFIGURADOS

Após a configuração da aplicação e remoção da falta, verifique se a sequência de eventos foi inserida corretamente na janela de Transient Stability.

A configuração deve apresentar inicialmente a aplicação da falta na Barra 3 e, posteriormente, a eliminação da perturbação no instante definido de 1,05 s. Essa sequência de eventos será utilizada pelo PowerWorld Simulator durante a simulação dinâmica para avaliar o comportamento do sistema elétrico após a ocorrência do distúrbio.

A Figura 31 apresenta a sequência completa dos eventos configurados para a análise de estabilidade de ângulo, incluindo a aplicação e a remoção da falta no sistema elétrico.

Figura 31 – Sequência de eventos configurados para análise de estabilidade transitória no PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

33. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

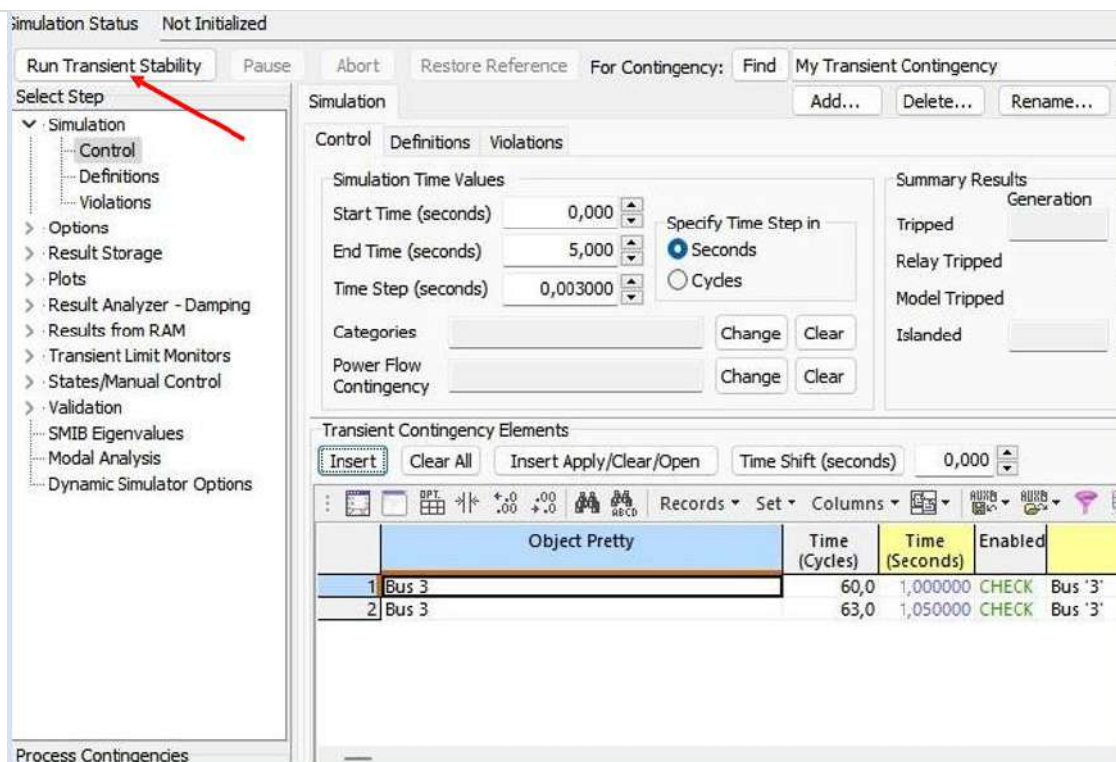
Após a configuração dos eventos de aplicação e remoção da falta, execute a simulação dinâmica do sistema elétrico. Para isso, clique na opção Run Transient Stability.

Ao iniciar a simulação, o PowerWorld Simulator realizará o cálculo do comportamento do sistema após a ocorrência da perturbação configurada. Como resultado, será apresentado um gráfico contendo a variação do ângulo de estabilidade pós-falta, permitindo avaliar a resposta dinâmica do sistema e verificar sua capacidade de permanecer em sincronismo.

Registre os valores e o comportamento apresentado no gráfico para utilização na análise dos resultados da atividade.

A Figura 32 apresenta o gráfico obtido após a execução da simulação de estabilidade transitória, contendo a resposta angular do sistema elétrico após a eliminação da falta.

Figura 32 – Gráfico do ângulo de estabilidade pós-falta no PowerWorld Simulator.



Fonte: Autor

Avaliando os resultados:

Com base no gráfico de estabilidade obtido após a aplicação e eliminação da falta, analise o comportamento dinâmico do sistema elétrico após a ocorrência da perturbação. Verifique a resposta angular do sistema e avalie se os geradores permanecem em sincronismo após o distúrbio aplicado na rede.

Na análise, procure responder aos seguintes questionamentos:

- O sistema elétrico conseguiu retornar a uma condição de operação estável após a eliminação da falta?
- O ângulo de estabilidade apresentou comportamento amortecido ou houve crescimento contínuo da oscilação?
- A perturbação aplicada na Barra 3 provocou alterações significativas no comportamento angular do sistema?
- Os resultados obtidos são coerentes com as características da rede elétrica e com a capacidade do sistema de manter o sincronismo após uma falta?
- O tempo de eliminação da falta (1,05 s) influenciou a estabilidade do sistema após a perturbação?

Checklist:

- ✓ Software PowerWorld Simulator aberto e novo caso de estudo criado;

- ✓ Parâmetros iniciais do simulador configurados, incluindo base de potência e sistema de unidades;
- ✓ Ambiente de simulação e opções de visualização do diagrama unifilar configurados;
- ✓ Sistema elétrico modelado no software, com inserção das quatro barras, linhas de transmissão, gerador e carga;
- ✓ Barra de referência (Slack Bus) configurada corretamente e demais barras inseridas sem essa configuração;
- ✓ Parâmetros elétricos das linhas de transmissão, do gerador e da carga definidos conforme o modelo proposto;
- ✓ Fluxo de potência executado no PowerWorld Simulator para obtenção das condições iniciais de operação do sistema;
- ✓ Ferramenta Transient Stability configurada para realização da análise de estabilidade de ângulo;
- ✓ Falta aplicada na Barra 3 e evento de eliminação da perturbação configurado conforme o tempo especificado;
- ✓ Simulação de estabilidade transitória executada e gráfico do comportamento angular obtido;
- ✓ Resultados da simulação analisados, avaliando a resposta do sistema após a ocorrência da falta e sua capacidade de manter o sincronismo.

RESULTADOS

Resultados do experimento:

Ao final desta aula prática, você deverá entregar um relatório (em Word).

O relatório deverá conter:

- ✓ Objetivo da prática.
- ✓ Descrição do sistema elétrico modelado no PowerWorld Simulator.
- ✓ Configuração dos parâmetros das barras, linhas de transmissão, gerador e carga.
- ✓ Representação do sistema elétrico desenvolvido no software.
- ✓ Configuração da ferramenta Transient Stability para análise da estabilidade de ângulo.
- ✓ Descrição da falta aplicada na Barra 3 e do procedimento de eliminação da perturbação.
- ✓ Resultado da simulação de estabilidade transitória obtido pelo PowerWorld Simulator.
- ✓ Gráfico do comportamento angular do sistema após a ocorrência da falta.

✓ Análise dos resultados da simulação, destacando a resposta do sistema após a perturbação e sua capacidade de permanecer em sincronismo.

✓ Discussão dos resultados, relacionando-os aos conceitos de estabilidade de ângulo em sistemas elétricos de potência.

✓ Conclusão da atividade.

Resultados de Aprendizagem:

Ao final desta prática, o estudante será capaz de compreender os conceitos relacionados à estabilidade de ângulo em sistemas elétricos de potência e sua importância para a manutenção do sincronismo entre os geradores após a ocorrência de perturbações. Além disso, será capaz de representar um sistema elétrico no ambiente computacional, configurar os parâmetros das barras, linhas de transmissão, gerador e carga, bem como realizar estudos de estabilidade transitória utilizando o PowerWorld Simulator.

O estudante também desenvolverá habilidades na interpretação dos resultados obtidos pela simulação, analisando o comportamento angular do sistema após a aplicação e eliminação de uma falta, relacionando a resposta dinâmica da rede à capacidade do sistema de permanecer estável após uma perturbação. Espera-se ainda que realize os procedimentos de modelagem e análise de forma organizada e criteriosa, verificando a correta configuração dos eventos, a consistência dos resultados computacionais e a coerência entre o comportamento observado na simulação e os conceitos de estabilidade de ângulo em sistemas elétricos de potência, desenvolvendo autonomia e rigor técnico na resolução de problemas relacionados à operação e análise de redes elétricas.