



DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL COMO CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL PROGRAM AS A CONTRIBUTION TO THE STUDY OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS

DESARROLLO DE UN PROGRAMA COMPUTACIONAL COMO CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA



<https://doi.org/10.56238/levv16n52-061>

Data de submissão: 26/08/2025

Data de publicação: 26/09/2025

Felipe Hernández García

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Endereço: Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: felipehernandez@furg.br

Roberto José Cabral

Instituição: Universidad Nacional de Misiones (UNaM)

Endereço: Misiones, Argentina

E-mail: cabral@fio.unam.edu.ar

Mario Orlando Oliveira

Instituição: Universidad Nacional de Misiones (UNaM)

Endereço: Misiones, Argentina

E-mail: mario.oliveira@fio.unam.edu.ar

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa computacional elaborado em linguagem C# para a análise de fenômenos associados a Sistemas Elétricos de Potência. O programa, chamado SimulSEP, facilita a modelagem de redes elétricas, através de um espaço de trabalho que permite a inserção de componentes, a interconexão e a edição dos parâmetros destes. A versão atual do programa permite a realização de simulações de curto-circuitos com base nos métodos de Componentes de Fases e de Componentes Simétricas. O trabalho mostra os resultados de simulações realizadas em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica de 14 barras. Para validação do método, dos algoritmos e do programa o Sistema foi projetado e simulado em programas profissionais de forte referência no ambiente acadêmico e de empresas do setor elétrico, no caso o ATPDraw e o ATP. As diferenças observadas entre os resultados do ATP e do SimulSEP são inferiores a 0,1% quando utilizado o Método de Componentes de Fases. O programa possibilitará estudos complementares como os relacionados com afundamentos de tensão, incluindo a elaboração de mapas de contorno relacionados com estes, constituindo-se como ferramenta didática e de apoio a pesquisas em Qualidade de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Afundamento de Tensão. Curto-círcuito. Método de Componentes de Fases. Simulação Computacional. Sistema Elétrico de Distribuição.



ABSTRACT

This paper presents the development of a computer program written in C# for the analysis of phenomena associated with Electrical Power Systems. The program, called SimulSEP, facilitates the modeling of electrical networks through a workspace that allows the insertion of components, their interconnection, and the editing of their parameters. The current version of the program allows for short-circuit simulations based on the Phase Component and Symmetric Component methods. The paper presents the results of simulations performed on a 14-bus Electrical Power Distribution System. To validate the method, algorithms, and program, the system was designed and simulated using professional programs that are highly regarded in academia and companies in the electrical sector, in this case ATPDraw and ATP. The differences observed between the ATP and SimulSEP results are less than 0.1% when using the Phase Component Method. The program will enable complementary studies, such as those related to voltage dips, including the creation of related contour maps, serving as a teaching tool and supporting research in Power Quality.

Keywords: Voltage Dip. Short Circuit. Phase Component Method. Computer Simulation. Electrical Distribution System.

RESUMEN

Este artículo presenta el desarrollo de un programa informático escrito en C# para el análisis de fenómenos asociados a sistemas eléctricos de potencia. El programa, denominado SimulSEP, facilita el modelado de redes eléctricas mediante un espacio de trabajo que permite la inserción de componentes, su interconexión y la edición de sus parámetros. La versión actual del programa permite realizar simulaciones de cortocircuito basadas en los métodos de componentes de fase y componentes simétricos. El artículo presenta los resultados de simulaciones realizadas en un sistema de distribución de energía eléctrica de 14 barras. Para validar el método, los algoritmos y el programa, el sistema se diseñó y simuló utilizando programas profesionales de reconocido prestigio académico y empresarial del sector eléctrico, en este caso ATPDraw y ATP. Las diferencias observadas entre los resultados de ATP y SimulSEP son inferiores al 0,1 % al utilizar el método de componentes de fase. El programa permitirá realizar estudios complementarios, como los relacionados con huecos de tensión, incluyendo la creación de mapas de contorno relacionados, sirviendo como herramienta docente y de apoyo a la investigación en calidad de la energía.

Palabras clave: Hueco de Tensión. Cortocircuito. Método de Componentes de Fase. Simulación por Computadora. Sistema de Distribución Eléctrica.

1 INTRODUÇÃO

A crescente complexidade e interconexão dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) exige ferramentas computacionais robustas para simular e analisar diferentes fenômenos operacionais. Questões como curtos-circuitos, afundamentos de tensão, estabilidade de tensão e impacto da geração distribuída afetam diretamente a confiabilidade e a qualidade da energia fornecida. Embora existam softwares amplamente utilizados, como Matlab/Simulink [1], EMTP/ATP [2], PSCAD [3] e DigSilent [4], muitos deles apresentam limitações relacionadas a custo, acessibilidade e flexibilidade para aplicações acadêmicas e de pesquisas.

Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento do SimulSEP, um programa computacional desenvolvido em linguagem C# voltado ao estudo e simulação de fenômenos em SEPs. Entre suas principais contribuições destacam-se:

- Implementação de métodos de cálculo de curto circuitos – incluindo o Método de Componentes de Fases (MCF) [5-7] e o Método de Componentes Simétricas (MCS) [8, 9] – permitindo comparar resultados em sistemas equilibrados e desequilibrados.
- Ambiente gráfico interativo, que possibilita construir diagramas unifilares por meio de operações *drag & drop*, inserir componentes elétricos, ajustar parâmetros e visualizar resultados de forma intuitiva.
- Confiabilidade do programa, validado através da comparação dos resultados obtidos com aqueles fornecidos pelo software ATP, demonstrando elevada concordância.
- Análise complementar de afundamentos de tensão e elaboração de mapas de contorno, fornecendo uma ferramenta didática e de apoio à pesquisa em qualidade da energia elétrica.
- Potencial de expansão futura, com a integração de módulos para estudos de fluxo de potência, estabilidade transitória e impactos da penetração de geração renovável distribuída, temas atuais e de grande relevância.

Além de consolidar uma alternativa acessível e adaptável para a modelagem de SEPs, o programa SimulSEP contribui ao meio acadêmico e de pesquisas ao oferecer uma plataforma aberta a melhorias, permitindo que estudantes e pesquisadores implementem novas funcionalidades de acordo com suas necessidades.

Trabalhos recentes reforçam a relevância dessa linha de pesquisa, evidenciando o papel de ferramentas computacionais customizáveis na análise, planejamento e operação de redes modernas com alta penetração de renováveis e elementos inteligentes [10-13]. Essas abordagens apontam para um futuro em que a integração entre métodos clássicos de análise e plataformas de simulação flexíveis será essencial para garantir sistemas elétricos mais resilientes e sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho tem o intuito de dar a conhecer um programa computacional em desenvolvimento para estudos de fenômenos relacionados com os SEPs, que chamamos de SimulSEP, mostrando alguns resultados já obtidos.

O programa está sendo elaborado em linguagem C#, para *Windows*, utilizando o *Visual Studio* [14] como ferramenta de desenvolvimento. A Fig. 1 mostra a janela de inicialização do programa.

Os resultados mostrados neste documento são relacionados com a análise do evento “curto-circuito”, para cujo estudo foi utilizado e programado o MCF. Os resultados correspondem a simulações realizadas em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) de 14 barras, de topologia semelhante a uma seção do sistema de referência de 123 barras do IEEE [15].

Figura 1 – Janela principal do programa SimulSEP.



2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MCF

Para um circuito em corrente alternada constituído por n malhas, a utilização da Lei de Tensões de Kirchhoff [16] para aplicar o método das correntes de malha [17], produz o sistema de equações linearmente independentes (1) e (2):

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \cdots + Z_{1n}I_n \\ V_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \cdots + Z_{2n}I_n \\ &\vdots \\ V_n &= Z_{n1}I_1 + Z_{n2}I_2 + \cdots + Z_{nn}I_n \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z} \mathbf{I} \quad (2)$$

Onde:

V_i constitui a soma das tensões das fontes presentes na malha i , I_i é a corrente de malha correspondente, Z_{ii} corresponde à soma das impedâncias contidas apenas na malha i e Z_{ij} é a impedância compartilhada com a malha j (pode envolver várias impedâncias as quais serão somadas). A matriz \mathbf{Z} é quadrada de ordem n , e \mathbf{V} e \mathbf{I} são vetores. Sendo as tensões conhecidas, a solução do sistema de equações revela o valor das correntes de malha, isto é:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{V} \quad (3)$$

Outra possibilidade é empregar a Lei de Correntes de Kirchhoff [16] para aplicar o método das tensões de nó [17], do qual resulta:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_1 - Y_{12}V_2 - \cdots - Y_{1n}V_n \\ I_2 &= -Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 - \cdots - Y_{2n}V_n \\ I_n &= -Y_{n1}V_1 - Y_{n2}V_2 - \cdots + Y_{nn}V_n \end{aligned} \quad (4)$$

Onde :

I_i constitui a soma das correntes dos elementos conectados ao nó i e V_i é a tensão do nó correspondente. Nos estudos dos SEPs as barras constituem os nós do sistema, podendo expressar (4) como:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{barra} \mathbf{V} \quad (5)$$

Onde:

\mathbf{Y}_{barra} é a matriz admitância de barras do SEP, com suas linhas representando cada uma das barras do mesmo. Em (4) e (5) os elementos ij representam as admitâncias das linhas elétricas que conectam a barra i com as outras barras, como a barra j . O elemento ii representa a admitância própria da barra i , a qual é determinada considerando as admitâncias das linhas e todos os componentes conectados à barra, isto é [18]:

$$Y_{barra_ii} = \sum_{k=1}^n Y_{ik} = \sum_{k=1}^n 1/Z_{ik} \quad (6)$$

$$Y_{barra_ij} = -Y_{ij} \quad (7)$$

Em análises de faltas é comum utilizar a matriz impedância de barras, \mathbf{Z}_{barra} , que de forma semelhante a \mathbf{Y}_{barra} relaciona as impedâncias dos componentes do sistema. A construção de \mathbf{Z}_{barra} não

é trivial. Em [19] são analisadas técnicas para a construção desta. Entretanto, dada a facilidade de construção de \mathbf{Y}_{barra} , a partir de (6) e (7), é comum construir esta matriz inicialmente e após, determinar \mathbf{Z}_{barra} :

$$\mathbf{Z}_{barra} = \mathbf{Y}_{barra}^{-1} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em SEPs equilibrados, com tensões iguais em magnitude e apenas defasadas em 120° , o curto-círcuito trifásico-terra em uma barra ou em qualquer outro ponto da rede produzirá correntes de falta iguais nas três fases, apenas diferenciadas nos ângulos ($\pm 120^\circ$) e determinadas utilizando a Lei de Ohm:

$$I_{cc_i} = \frac{V_{pf_i}}{z_{ii}} \quad (9)$$

Onde:

V_{pf} representa a tensão pré-falta na barra i e z_{ii} é o elemento ii da diagonal principal de \mathbf{Z}_{barra} (correspondente à barra i).

Outros tipos de faltas, como as bifásicas, com ou sem contato a terra, e as monofásicas provocam o desequilíbrio dos SEPs, originando valores de tensão e de corrente diferentes nas três fases, em módulo e ângulo, descartando uma análise direta, como a mostrada acima.

Quando o SEP está desequilibrado a análise é realizada considerando as três fases, com cada componente modelado através de uma matriz quadrada, de ordem 3. Transformadores e geradores trifásicos apresentam uma matriz mais simples, diagonal, na forma:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_a & 0 & 0 \\ 0 & z_b & 0 \\ 0 & 0 & z_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

os elementos da diagonal principal representam a impedância própria de cada uma das fases (enrolamentos), sendo as três iguais. Estas impedâncias, assim como aquelas das cargas trifásicas, são geralmente obtidas da



documentação técnica desses componentes. Caso a documentação não as ofereça especificamente, outros dados serão utilizados para determiná-las, como por exemplo:

$$z_{abc} = \frac{|V|^2}{S^*} \quad (11)$$

Onde:

V é a tensão nominal e S é a potência aparente.

Quanto à linha elétrica, a matriz de impedância tem a forma de (12), com elementos na diagonal principal e fora desta. Isto é por causa da influência entre os condutores elétricos nos alimentadores, dado que podem não estarem dispostos de forma transporta:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde:

z_{kk} e z_{kq} representam a impedância própria da fase k e a impedância mútua entre as fases k e q , respectivamente. A matriz \mathbf{Z}_L é simétrica, isto é, $z_{kq} = z_{qk}$.

Com a matriz da linha é determinada a matriz de admitância correspondente ($\mathbf{Y} = \mathbf{Z}^{-1}$) para logo determinar a matriz de admitância de fase de cada barra, \mathbf{Y}_{abc} . Para isto último é empregada (6), recalculando apenas os elementos ii , ao considerar outros componentes conectados à barra. As matrizes \mathbf{Y}_{abc} e \mathbf{Z}_{abc} revelam como se relacionam as tensões e correntes nas três fases das barras. Assim como \mathbf{Z}_L a matriz \mathbf{Y}_{abc} é quadrada, de ordem 3.

Determinada \mathbf{Y}_{abc} para todas as barras é construída a matriz admitância do SEP, em que cada elemento é uma matriz quadrada de ordem 3:

$$\mathbf{Y}_{barras} = \begin{bmatrix} (\mathbf{Y}_{11})_{abc} & \mathbf{Y}_{12} & \dots & \mathbf{Y}_{1n} \\ \mathbf{Y}_{21} & (\mathbf{Y}_{22})_{abc} & \dots & \mathbf{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{n1} & \mathbf{Y}_{n2} & \dots & (\mathbf{Y}_{nn})_{abc} \end{bmatrix} \quad (13)$$



Onde:

Y_{Lij} é a matriz admitância da linha entre as barras i e j (Eq. 7) e Y_{ii} é a matriz admitância própria de cada barra (Eq. 6). Caso não exista conexão entre as barras i e j , $Y_{Lij} = Y_{Lji} = \mathbf{0}_{3 \times 3}$.

Finalmente, é determinada a matriz impedância de barras do SEP, na qual, diferentemente da matriz utilizada para um sistema equilibrado (Eq. 8), cada elemento dela é uma submatriz quadrada, de ordem 3. Isto é:

$$Z_{barra} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \begin{bmatrix} z_{44} & z_{45} & z_{46} \\ z_{54} & z_{55} & z_{56} \\ z_{64} & z_{65} & z_{66} \end{bmatrix} & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & \begin{bmatrix} z_{(n-2)(n-2)} & z_{(n-2)(n-1)} & z_{(n-2)(n)} \\ z_{(n-1)(n-2)} & z_{(n-1)(n-1)} & z_{(n-1)(n)} \\ z_{(n)(n-2)} & z_{(n)(n-1)} & z_{nn} \end{bmatrix} & & & \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

Z_{barra} é uma matriz quadrada, de ordem $3n$, onde n é o número de barras do SEP.

Cada submatriz na diagonal principal de (14) representa a matriz de impedância de Thévenin de cada barra. Os elementos da diagonal principal destas submatrizes representam a impedância equivalente de Thévenin vista desde cada fase, em cada barra i , e podem ser encontrados nas posições seguintes:

$$\begin{aligned} z_{ai} &= (3i - 3) + 1 \\ z_{bi} &= (3i - 3) + 2 \\ z_{ci} &= (3i - 3) + 3 \end{aligned} \quad (15)$$

Assim, por exemplo, à barra número 2, corresponderão os elementos $z_{a2} = z_{barra4,4}$, $z_{b2} = z_{barra5,5}$, $z_{c2} = z_{barra6,6}$.

A corrente de curto-circuito na fase k de uma barra i será determinada como:

$$I_{cc_ki} = \frac{V_{pf_ki}}{z_{qq_ki}} \quad (16)$$

Onde:

V_{pf} é a tensão pré-falta na fase k da barra i e z_{qq} é a impedância equivalente de Thévenin vista desde essa fase.

2.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM

A Fig. 2 mostra o diagrama elétrico do SDEE utilizado neste trabalho, sendo dessa forma unifilar em que é projetado no SimulSEP.

O SDEE é de 14 barras e tem cargas em cada uma delas. A subestação está formada por um banco de três transformadores monofásicos conectados em YY, com reatância de $j0,375 \Omega$ (por fase). A alimentação deste banco é realizada por uma linha de potência de curto-circuito infinita, com tensão de linha igual a 4,16 kV e frequência de 60 Hz [15].

A Fig. 3 mostra o fluxograma relacionado com o MCS implementado no programa SimulSEP. Para validar os resultados foram utilizados os programas ATPDraw [20] e ATP. No ATPDraw foi modelado o SDEE apresentado na Fig. 2, forçando faltas monofásicas em cada uma das barras (curtos-circuitos). As correntes reportadas pelo programa ATP serviram de referência.

Figura 2 – Diagrama unifilar do SDEE projetado no SimulSEP.

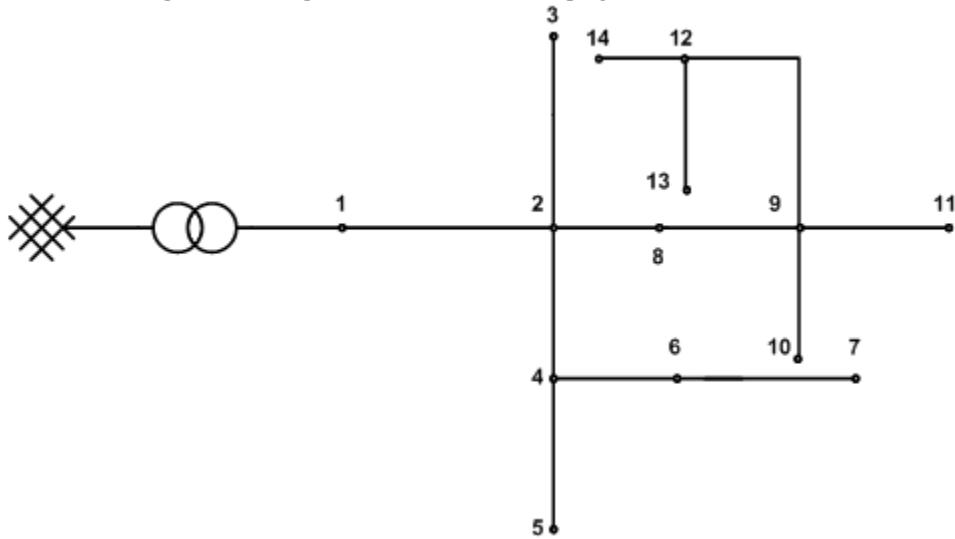
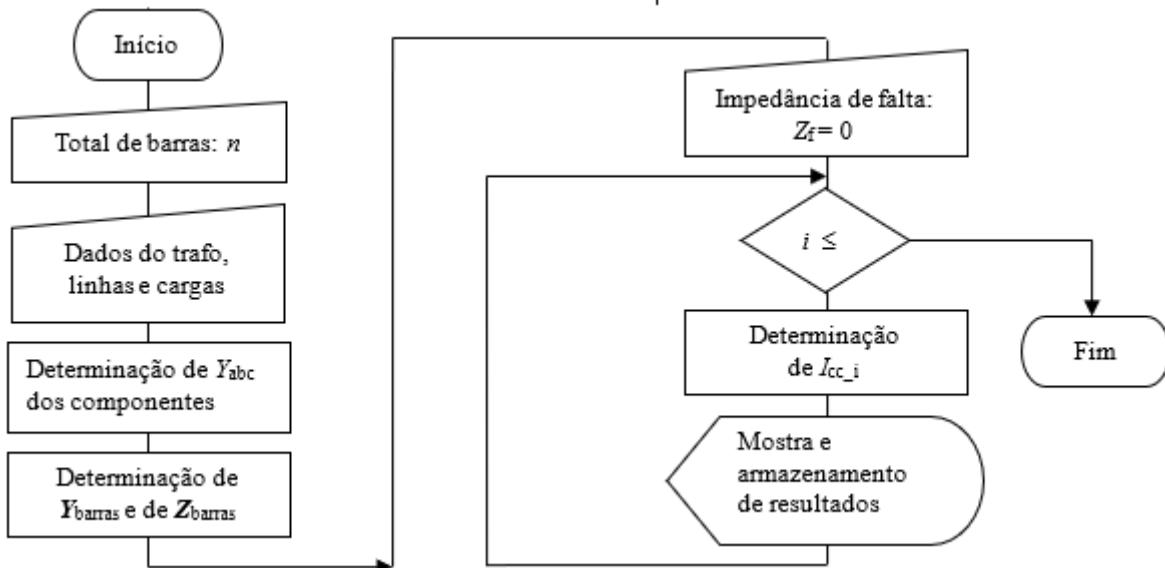


Figura 3 – Fluxograma relacionado com o MCF programado no SimulSEP.



Salientamos que outro método de análise de SEPs, no caso de Componentes Simétricas, também foi modelado e testado. Contudo, em determinados estudos os resultados das correntes de curto-circuito divergiram significativamente das correntes de referência (do programa ATP). As divergências em algumas barras superaram o 5% quando o SDEE foi fortemente desequilibrado, por isso, quando concluída sua implementação no programa, estará reservado para sistemas equilibrados, tais como os Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig.1 mostrou a janela de apresentação do programa SimulSEP, indicando sua finalidade. O programa está sendo desenvolvido para *Windows*, através de *WinForms*. A janela do programa pode ser dimensionada conforme o tamanho do SEP trabalhado, inclusive pode ser maximizada ao tamanho da tela do computador.

Na versão atual o programa conta com um menu principal através do qual são selecionadas e utilizadas as funcionalidades do programa. Algumas das opções do menu aparecem inicialmente desabilitadas, mudando de estado quando um projeto é iniciado. Com a seleção de qualquer opção a imagem da tela de apresentação desaparece, ficando o espaço de trabalho em preto. Opções originadas em elementos de tipo *pop-up* também estão presentes, inclusive para troca dessa cor preta inicial (também pode ser modificada através da opção “Ferramentas”). Estes *pop-ups* aparecerão ao clicar com o botão direito do *mouse* sobre um dos componentes ou do espaço de trabalho.

O primeiro passo na utilização do programa é o desenho do SEP a ser trabalhado. Através da opção “Projeto” define-se o número de barras do sistema, as quais então aparecem na tela na quantidade definida e podem ser movimentadas até a posição desejada (*drag & drop*), preparando o unifilar para uma imagem previamente conhecida (da Fig. 2, por exemplo). As barras aparecerão

numeradas consecutivamente, codificação que poderá ser modificada posteriormente. Uma grade pode ser visualizada para facilitar o posicionamento das barras e demais objetos. O programa identifica a cor do espaço de trabalho para que as barras surjam com cor diferente. Essa cor também pode ser modificada, por intermédio de um *pop-up* ou do item “Componentes” do menu. A mudança de cor é geral, para todas as barras. Contudo, quando se clica em uma barra, a cor da mesma mudará, para sinalizar que ela ativou o *pop-pu*. A Fig. 4a mostra o resultado deste feito.

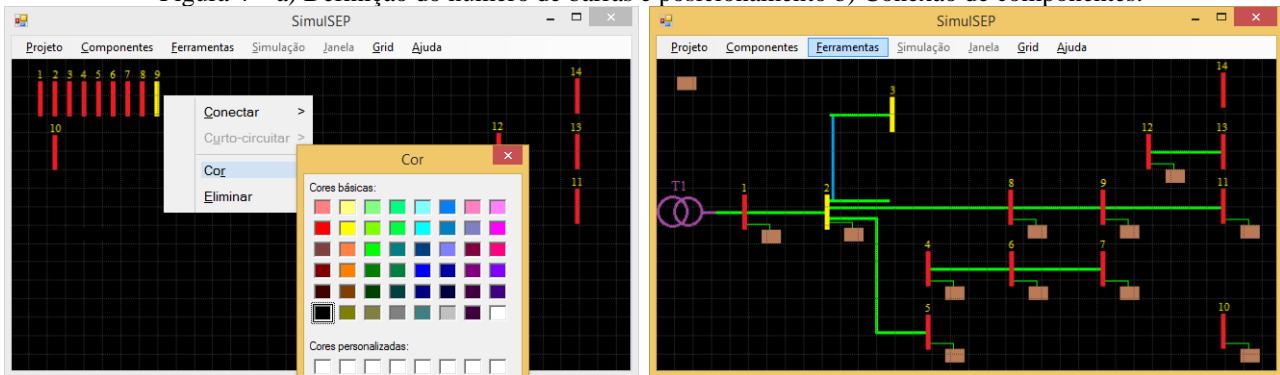
Os próximos passos estão relacionados com inserir os demais componentes elétricos que farão parte do sistema. Esta operação pode ser realizada através da opção correspondente no *pop-up* que surge ao clicar sobre as barras. Neste caso o componente surge próximo à barra, sendo automaticamente conectado à mesma. Caso a inserção seja realizada através da opção “Componente” do menu, o componente surgirá próximo ao canto superior esquerdo do espaço de trabalho e poderá ser movimentado (arrastado) até a posição desejada junto às barras. Na versão atual do SimulSEP o número de cargas está limitado ao número de barras.

Os símbolos utilizados para os componentes correspondem aos utilizados nos projetos de sistemas elétricos [21, 22].

Por último, deve ser realizada a conexão entre os componentes ainda desconectados com as barras correspondentes e estas devem ser conectadas entre si. Para a conexão pode ser utilizado o menu “Componentes” ou a opção correspondente no *pop-up* que aparece ao clicar nos componentes e nas barras. Quando se define que duas barras estão conectadas entre si o programa solicita a distância entre as mesmas.

As conexões entre os componentes e as barras resultaram ser de fácil implementação, através de linhas desenhadas com objetos *Pens*. Embora o programa não precise das conexões “físicas” para seu trabalho (as mostradas na tela), elas são elementais para a compreensão do circuito elétrico. O programa calcula as coordenadas apropriadas (e os tamanhos) para que as conexões sejam graficamente estabelecidas. Já as conexões entre as barras, representativas das linhas elétricas, tiveram uma implementação mais elaborada, através de elementos que podem ser movimentados (arrastados). Isto porque geralmente as barras não estão posicionadas em linha reta e as conexões têm que ser ajustadas. Essas conexões são estabelecidas automaticamente, mas é possível modificá-las, através do *pop-up* correspondente. Na Fig. 4b, por exemplo, está sendo modificada a conexão entre as barras 2 e 3. O trecho de linha vertical em azul deverá ser arrastado até a posição desejada, momento em que o desenho da linha é finalizado.

Figura 4 – a) Definição do número de barras e posicionamento b) Conexão de componentes.



As Tabelas 1 e 2 mostram as características das cargas utilizadas no SDEE, cujos valores de impedância são inseridos no SimulSEP através da opção “Componentes” ou através do *pop-up* que surge ao clicar sobre cada uma das cargas.

Tabela 1 – Impedâncias correspondentes às cargas nas barras 2 a 8 do SDEE*

Barra	2	3	4	5	6	7	8
Z (Ω)	$28 + j18$	$27 + j17$	$22 + j15$	$21 + j15$	$20 + j15$	$18 + j17$	$21 + j15$

*Fonte: [15].

Tabela 2 – Impedâncias correspondentes às cargas nas barras 9 a 14 do SDEE*

Barra	9	10	11	12	13	14
Z (Ω)	$16 + j14$	$16 + j13$	$16 + j12$	$14 + j12$	$14 + j8$	$13 + j10$

*Fonte: [15].

Em qualquer momento o sistema pode ser salvo, através da opção correspondente na opção “Projeto”.

A opção “Ferramentas” do menu permite atualmente que sejam fornecidas as informações dos condutores elétricos utilizados nas linhas, assim como a distribuição destes nas mesmas. As Fig. 5a e 5b mostram as janelas do programa quando dados são solicitados. A Tabela 3 mostra os dados das linhas elétricas do SDEE. O programa utiliza as equações modificadas de Carson [23] para determinar a matriz de impedância das linhas. Os valores das impedâncias próprias e mútuas destas podem ser observados após definir as características dos condutores elétricos.

Figura 5 – Solicitação de dados pontualmente: a) de uma carga b) de uma linha elétrica.

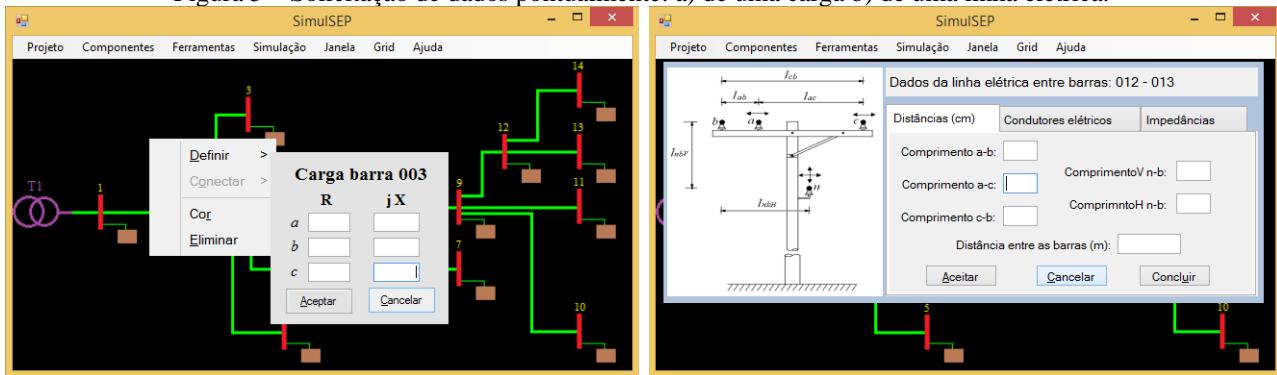


Tabela 3 – Características dos ramais da rede elétrica do SDEE

Ramal	1-2	2-3	2-4	4-5	4-6	6-7	2-8	8-9	9-10	9-11	9-12	12-13	12-14
Config*	C601	C602	C601	C602	C001	C602	C601	C601	C602	C602	C001	C602	C602
L (m)	1226	1609	1287	1287	1226	1287	966	1226	1226	1287	1448	1226	966

*Configuração. Fonte: IEEE [1].

Através da opção “Ferramentas” também é possível ajustar o desenho das linhas elétricas, resultando na situação mostrada na Fig. 4b, assim como o formato da área dos gráficos e as curvas de resultados, como será mostrado mais a frente.

Novas funcionalidades estão sendo preparadas para incorporar à opção “Ferramentas”, como por exemplo, ver e salvar as matrizes de impedância de barras e desenhar mapas de contorno.

A opção “Simulação” do menu permite selecionar e iniciar o tipo de estudo que será realizado. Atualmente contém apenas o curto-circuito através do MCF e do MCS. Especificamente nestes casos, o programa provoca sequencialmente faltas em cada uma das barras e calcula a correntes de curto-circuito correspondentes. Com esta opção a simulação é realizada utilizando a mesma impedância de falta em todas as barras, com valor que pode ser alterado antes de iniciar o processo. A Fig. 2 mostrou o fluxograma relacionado com o MCF quando a simulação é realizada para todas as barras.

Para simulação de falta em uma barra em particular é possível provocá-la utilizando a opção “Curto-circuitar” do *pop-up* que aparece ao clicar sobre a barra. Neste caso também é possível modificar o valor da impedância de falta. Nas simulações realizadas, em cada uma das barras, os resultados coincidiram com os obtidos através da opção geral.

No futuro, as simulações de Fluxo de Potência, de Estabilidade de Tensão e de outros tipos de análises/eventos serão integradas a esta opção (“Simulação”).

A opção “Janela” do menu tem um nome provisório. Clicando nesta opção alternamos entre a tela com o unifilar e a tela com os resultados da simulação.

As Fig. 6a e 6b mostram as janelas do programa com os resultados das correntes de curto-circuito calculadas (na fase *a*). A Fig. 6a corresponde ao SDEE com cargas balanceadas (Tabelas 1 e 2). A Fig. 6b corresponde ao caso em que as cargas de duas barras foram desbalanceadas, conforme

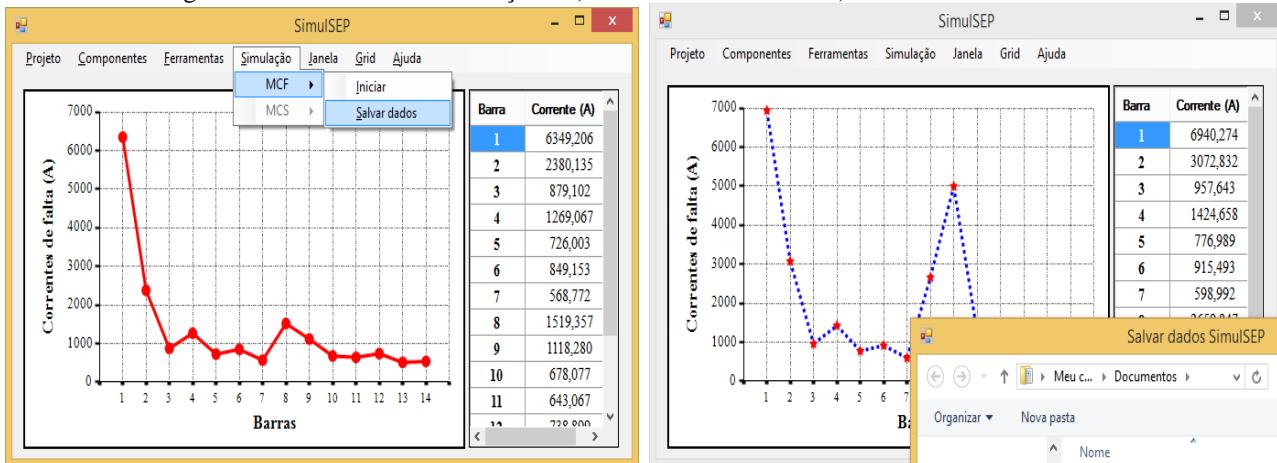
indicado na Tabela 4. Ainda para este último caso, um gerador independente (trifásico) foi colocado junto à barra 9 do SDEE.

Tabela 4 – Impedâncias correspondentes a cargas desbalanceadas*

Fase	Barra	
	7	14
a	$5 + j3$	$3 + j3$
b	$8 + j4$	$2 + j6$
c	$9 + j2$	$4 + j2$

*valores em Ohms (Ω)

Figura 6 – Resultados de simulações: a) de SDEE balanceado b) de SDEE desbalanceado.

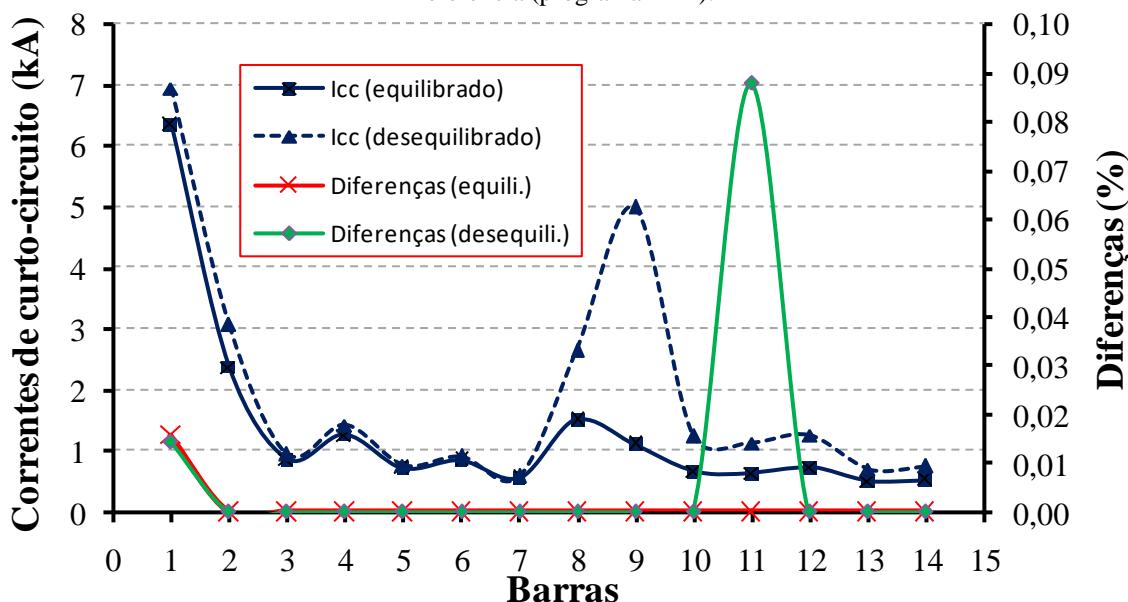


Com relação aos resultados propriamente, primeiramente, verifica-se uma excelente coincidência com aqueles que serviram de referência. Isto demonstra que as peculiaridades do equacionamento foram dominadas, que os algoritmos estão corretos e que a programação foi realizada apropriadamente.

As correntes de curto-círcuito são oferecidas em forma de gráfico e em tabela, e podem ser salvas em arquivos tipo texto para posterior tratamento em programas de análise. A Fig. 7, por exemplo, mostra os resultados do SimulSEP processados no programa Excel, ao tempo que compara estes resultados com os obtidos através do programa ATP. A comparação pode ser realizada através das diferenças entre os resultados, obtidas empregando a expressão:

$$\Delta(\%) = 100 \frac{I_{ccMCF} - I_{ccATP}}{I_{ccATP}} \quad (17)$$

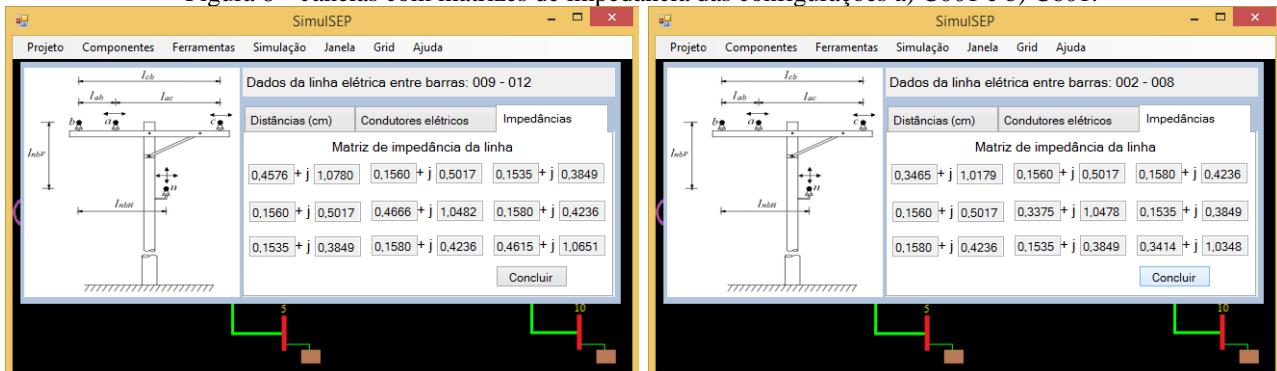
Figura 7 – Correntes de curto-círcuito obtidas com o programa SimulSEP e diferenças relativas com as correntes de referência (programa ATP).



No referente às correntes, observa-se uma correta correspondência dos valores obtidos em relação à distância da fonte, no caso representada pela subestação. Desse modo, as maiores correntes são observadas na barra 1, a mais próxima da subestação, assim como nas barras 2, 4 e 8. Coincidentemente os trechos que conectam estas barras obedecem à configuração C601 que é a que tem os menores valores de impedâncias próprias e mútuas entre seus condutores. O trecho até a barra 8 é menor que até a barra 4 (considerando a barra 2), por isso a impedância da linha é menor e por isso a corrente de curto-círcuito é maior na barra 8 que na barra 4. Contudo ambas correntes são inferiores àquela da barra 2. Veja-se que na barra 7 a corrente é inferior àquela da barra 5, pois esta última está a uma menor distância. A Eq. (18) e a Fig. 8 mostraram as matrizes de impedâncias das linhas do SDEE (configurações).

$$Z_{C602} = \begin{bmatrix} 0,7526 + j1,1814 & 0,1580 + j0,4236 & 0,1560 + j0,5017 \\ 0,1580 + j0,4236 & 0,7475 + j1,1983 & 0,1535 + j0,3849 \\ 0,1560 + j0,5017 & 0,1535 + j0,3849 & 0,7436 + j1,2112 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Figura 8 – Janelas com matrizes de impedância das configurações a) C001 e b) C601.



Análises semelhantes podem ser realizadas com as barras 10, 11 e 12, considerando a barra 9 como referência. As barras 10 e 11 estão aproximadamente à mesma distância e são alimentadas por linhas com configuração C602, veja-se que as correntes são semelhantes. Já a barra 12 está a maior distância, contudo, a corrente nela é maior, já que seu alimentador (C001) tem impedâncias menores.

A barra 4 alimenta as barras 5 e 6. A distâncias entre as barras são aproximadamente iguais, contudo, a corrente na barra 5 é inferior à observada na barra 6, isto, porque as impedâncias da configuração C602 são as maiores de todas.

Este “padrão” de comportamento é mantido após a inserção do gerador independente na barra 9 do SDEE, comprovado na Fig. 7 pela forma semelhante das curvas. Nesta situação todas as correntes aumentaram, particularmente na barra 9 e nas barras próximas. Ainda, dá para comprovar a influência das configurações sobre as correntes, veja-se que a corrente na barra 8 é superior àquela da barra 10, sendo que as duas barras estão à mesma distância da barra 9.

Salientamos que com as simulações de faltas, além de verificar as magnitudes das correntes de curto-circuito pretendemos realizar outras análises. Por exemplo, a partir das tensões nas diferentes barras são realizados estudos de afundamentos de tensão. A visualização das tensões ainda não foi concluída nas janelas do SimulSEP, mas estão disponíveis no *Console* do *Visual Studio*. Considerando um limite de 0,9 p.u. a matriz binária de afundamentos de tensão de (19) foi elaborada com ajuda do Excel, onde:

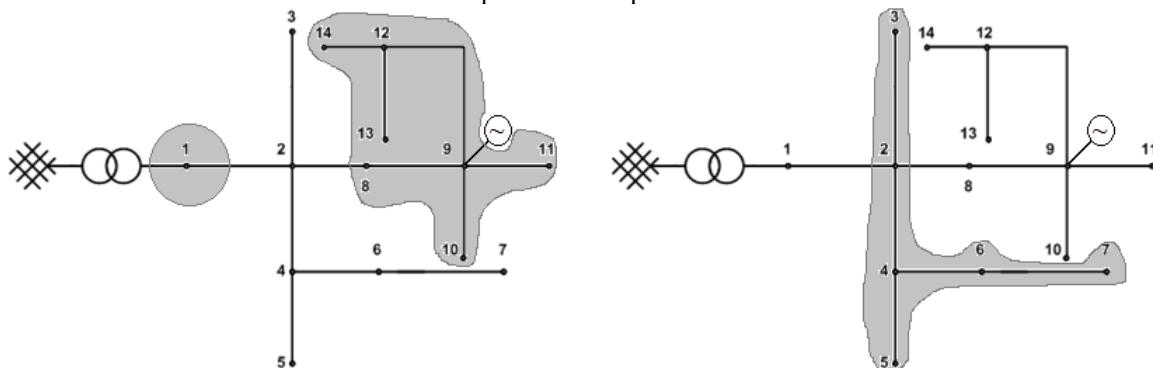
- 1 ≡ Quando $V_a \leq 0,9$ p.u. Significa barra com afundamento de tensão.
- 0 ≡ Quando $V_a > 0,9$ p.u. Significa barra sem afundamento de tensão.

Nesta matriz cada linha representa o estado numa barra, diante de uma falta nela, assim como o estado das outras barras, por causa dessa falta. Assim, como o curto-circuito em uma barra provoca o afundamento de tensão nela própria ($V_a = 0$), os elementos da diagonal principal mostram “1”. As colunas revelam se a tensão nas outras barras diminuiu a ponto de provocar afundamento de tensão nelas. Assim por exemplo, a linha número 2 revela que diante de uma falta na barra 2, todas as barras experimentam afundamento de tensão. Já a linha 14 revela que diante de uma falta na barra 14 apenas as barras 12 e 13 sofrem afundamento de tensão (além da barra 14).

$$MAT = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \blacksquare & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & \blacksquare & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Com estas informações será possível elaborar mapas de contorno como os da Fig. 9, os quais pretendemos que sejam visualizados no programa SimulSEP.

Figura 9 – Mapas de contorno relacionados com faltas na barra 7: a) áreas de imunidade (que não serão afetadas) b) áreas expostas e susceptíveis.



4 CONCLUSÕES

O trabalho mostrou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional desenvolvida em uma das linguagens de programação de maior utilização na atualidade: o C#.

Os resultados apresentados confirmam a consistência dos algoritmos implementados no SimulSEP, evidenciada pela elevada concordância com as correntes de curto-círcuito calculadas no ATP. O programa mostrou-se capaz de representar adequadamente sistemas de distribuição equilibrados e desequilibrados, permitindo ainda a análise de afundamentos de tensão e a geração de mapas de contorno.

Entre as principais contribuições, destacam-se:

- a implementação de dois métodos de cálculo: o de componentes de fase e o de componentes simétricas,
- a possibilidade de expansão futura para estudos de fluxo de potência, estabilidade de tensão e qualidade de energia,
- e o potencial do programa como ferramenta didática e de pesquisa.

Com o programa não se pretende produzir uma ferramenta profissional concorrente a softwares já estabelecidos na área de análise de Sistemas Elétricos de Potência. Entretanto, sua elaboração está permitindo a participação espontânea de estudantes, contribuindo para o desenvolvimento de habilidades e a formação de competências. Ao mesmo tempo, tem permitido a consolidação do trabalho interdisciplinar e a colaboração interuniversidades.

Como trabalhos futuros pretende-se ampliar as funcionalidades da opção “Simulação”, incluir a exportação direta de resultados em diferentes formatos e aprimorar a representação gráfica dos resultados de fenômenos elétricos. O SimulSEP, portanto, se revela como uma contribuição relevante ao estudo e à prática na área de Sistemas Elétricos de Potência.



REFERÊNCIAS

- 1 - MathWorks Inc. (2025). *Software Matlab*. Disponível em: <https://www.mathworks.com>.
- 2 - European EMTP-ATP Users Groups e.V. (2025). *EMTP – Electromagnetic Transient Program*. Disponível em: <https://atp-emtp.org>.
- 3 - Manitoba Hydro International Ltd. (2025). *Software PSCAD*. Disponível em: <https://www.pscad.com>.
- 4 - DigSilent Power System Solution. (2025). *Software DigSilent*. Disponível em <https://www.digsilent.de>.
- 5 - Laughton, M.A. (1968). Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates. Part I: System representation in phase frame of reference. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 115(8). <https://doi.org/10.1049/piee.1968.020>.
- 6 - Laughton, M.A. (1969). Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates. Part II: Fault analysis. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 116(5). <https://doi.org/10.1049/piee.1969.0160>
- 7 - Makram, E.B; Bou-Rabee, M.A. & Girgis, A.A. (1987). Three-Phase Modeling of Unbalanced Distribution Systems during Open Conductors and/or Shunt Fault Conditions Using the Bus Impedance Matrix. *Electric Power Systems Research*, 13(3). [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(87\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0378-7796(87)90002-2).
- 8 - Fortescue, C.L. (1918). Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. *AIEE Transactions*, vol. 37, part II. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1918.4765570>.
- 9 - Wagner, C.F. & Evans, R.D. (1933). *Symmetrical Components as Applied to the Analysis of Unbalanced Electrical Circuits*. 1st ed., McGraw-Hill, New York.
- 10 - Olivares, D.E.; Mehrizi-Sani, A; Etemadi, A.H.; Cañizares, C.A.; Iravani, R. & Kazerani, M. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4). <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- 11 - Dugan, R.C & McDermott, T.E. (2011). An open source platform for collaborating on smart grid research. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039829>
- 12 - Han, R. & Zhou, Q. (2016). Data-driven solutions for power system fault analysis and novelty detection. *11th International Conference on Computer Science & Education*. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2016.7581560>
- 13 - Liang, X.; Chai, H. & Ravishankar, J. (2022). Analytical Methods of Voltage Stability in Renewable Dominated Power Systems: A Review. *Electricity*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/electricity3010006>
- 14 - Microsoft. (2025). Visual Studio: IDE e Editor de Código para Desenvolvedores. Disponível em: <https://visualstudio.microsoft.com>



- 15 - Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE. (2025). *IEEE PES Test Feeder*. <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources>
- 16 - Kirchhoff, G. (1958). On the Solution of the Equations Obtained from the Investigation of the Linear Distribution of Galvanic Currents. *IRE Transactions on Circuit Theory*, 5(1). <https://doi.org/TCT.1958.1086426>
- 17 - Hayt, W.H. & Kemmerly, J.E. (1962). *Engineering Circuit Analysis*, 2nd ed., New York, Estados Unidos de América: McGraw-Hill.
- 18 - Stevenson, W.D. (1962). *Elements of Power System Analysis*. McGraw-Hill Book Company, Inc., 2nd ed., New York.
- 19 - Grainger, J.J. & Stevenson, W.D. (1994). *Power System Analysis*. New York, USA: McGraw-Hill.
- 20 - ATPDraw – The graphical preprocessor to ATP Software Electromagnetic Transient Program. (2025). *Software ATPDraw*. Disponível em: <http://www.atpdraw.net>
- 21 - Asociação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2025). NBR 5460 – Sistemas Elétricos de Potência. Disponível em: <https://abnt.org.br>
- 22 - International Electrotechnical Commision – IEC (2025). IEC 60617 – Graphical symbols for diagrams. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en>
- 23 - Kersting, W. H. (2007). *Distribution System Modeling and Analysis*. 2nd ed., Boca Raton, Florida, USA.