

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS MG**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MARCOS CARVALHO LUZ**

**DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA O CÁLCULO DO FLUXO DE  
POTÊNCIA UTILIZANDO O MATLAB**

**Varginha**  
**2016**

**MARCOS CARVALHO LUZ**

**DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA O CÁLCULO DO FLUXO DE  
POTÊNCIA UTILIZANDO O MATLAB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Thiago Cornélio da Fonseca.

**Varginha  
2016**

**MARCOS CARVALHO LUZ**

**DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA O CÁLCULO DO FLUXO DE  
POTÊNCIA UTILIZANDO O MATLAB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: 06/12/2016

---

Prof. Thiago Cornélio da Fonseca

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Vieira Guedes

---

Eng. Sady Eustáquio de Melo

OBS.:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, aos meus pais, minhas irmãs e minha esposa que com muito carinho me apoiaram nos momentos mais difíceis dessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me apoiar e dar forças nos momentos mais difíceis, a minha família que estão juntos comigo nessa batalha diária, aos meus amigos que conheci no decorrer do curso e ao meu orientador prof. Thiago Cornélio da Fonseca que me instruiu na elaboração desse projeto.

“Em seu coração o homem planeja seu caminho, mas o Senhor determina seus passos”.

Provérbios 16:9

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema elétrico de potência simplificado.....	17
Figura 2 - Representação de um sistema trifásico. ....	18
Figura 3 - Representação sistema unifilar. ....	18
Figura 4 - Representação das barras. ....	18
Figura 5 - Modelo $\pi$ para linhas de transmissão.....	19
Figura 6 - Convenção de sinais positivos para fluxo de potência ativa e reativa. ....	20
Figura 7 - Modelo unifilar de um transformador.....	20
Figura 8 - Modelo unifilar de um gerador.....	21
Figura 9 - Modelo unifilar de uma carga.....	22
Figura 10 - Sistema exemplo de três barras .....	24
Figura 11 - Sistema exemplo de 3 barras .....	25
Figura 12 - Ambiente de trabalho do <i>software</i> Matlab .....	36
Figura 13 - Tela principal da ferramenta Guide .....	37
Figura 14 - Estrutura do software FluxPot.....	39
Figura 15 - Representação gráfica dos dados .....	40
Figura 16 - tela principal do <i>software</i> FluxPot.....	41
Figura 17 - Entrada de dados.....	42
Figura 18 - Saída de dados do FluxPot. ....	43
Figura 19 - Sistema de 3 barras. ....	44
Figura 20 - Sistema 3 barras para simulação didática.....	45
Figura 21 - Sistema de 9 barras .....	48
Figura 22 - Sistema elétrico de 14 barras do IEEE.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das linhas do sistema de 3 barras.....	45
Tabela 2 - Dados das barras do sistema de 3 barras .....	45
Tabela 3 - Fluxos de potência do sistema de 3 barras obtidos na literatura .....	46
Tabela 4 - Fluxos de potência do sistema de 3 barras obtidos no FluxPot .....	46
Tabela 5 - Comparação dos fluxos sem perdas para o sistema de 3 barras .....	47
Tabela 6 - Comparação dos fluxos com perdas para o sistema de 3 barras .....	47
Tabela 7 - Dados das linhas do sistema de 9 barras.....	48
Tabela 8 - Dados das barras do sistema de 9 barras .....	49
Tabela 9 - Comparação dos fluxos sem perdas para o sistema de 9 barras .....	49
Tabela 10 - Dados das linhas do sistema de 14 barras.....	51
Tabela 11 - Dados das barras do sistema de 14 barras .....	52
Tabela 12 - Comparação dos resultados do sistema de 14 barras .....	53

## RESUMO

O cálculo do fluxo de potência resume-se basicamente na determinação da tensão, da corrente, da potência ativa ou reativa em diversos pontos da rede elétrica. Este estudo é uma ferramenta fundamental para o planejamento, operação e simulação de sistemas elétricos de potência. De forma geral o cálculo do fluxo de potência é resolvido com equações numerosas e complexas devido à quantidade de cálculos envolvidos. Dessa forma surge a necessidade de *softwares* mais amigáveis, de fácil acesso e que possuam licença livre para que estes auxiliem na transposição dessas barreiras. Diante dessa dificuldade, este trabalho a fim de solucioná-las tem como objetivo desenvolver um *software* capaz de calcular o fluxo de potência em sistemas elétricos de potência utilizando a linguagem de programação oferecida pelo *software* Matlab. O desenvolvimento do *software* FluxPot focou-se em dois métodos de cálculo conhecidos pela literatura, o método linearizado e o método linearizado com perdas. O *script* de programação desenvolvido para as equações de fluxo juntamente com a *interface* gráfica criada na ferramenta Guide, mostraram-se funcionais nas simulações de sistemas elétricos de três, nove e quatorze barras, atendendo as expectativas do trabalho proposto.

**Palavras-chave:** Fluxo de potência. Matlab. Método Linearizado. *Guide*.

## **ABSTRACT**

*The calculation of the power flow basically boils down to the determination of voltage, current, active or reactive power at various points in the power grid. This study is a fundamental tool for the planning, operation and simulation of electrical power systems. In general, the calculation of the power flow is solved with equations and complexes due to the amount of calculations involved. In this way, there is a need for more user-friendly software that is easy to access and has a free license so that it can help in transposition to barriers. Given this difficulty, this work is an end-solution as the goal of a software capable of calculating power flow in electrical power systems using a programming language offered by Matlab software. The development of FluxPot software focused on two calculation methods known in the literature, the linearized method and the linearized method with losses. The programming script developed for the flow equations with a graphical interface created in the Guide tool, prove to be functional in simulations of electrical systems of three, nine and fourteen bars, meeting the expected work expectations.*

**Keyword:** *Power flow. Matlab. Linearized Method. Guide.*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
<b>2.1 Grandezas elétricas</b> .....	14
2.1.1 Resistência .....	14
2.1.2 Reatância .....	14
2.1.3 Impedância.....	15
2.1.4 Admitância.....	15
2.1.5 Condutância .....	16
2.1.6 Susceptância.....	16
<b>2.2 Sistemas elétricos de potência</b> .....	16
2.2.1 Representação unifilar .....	17
2.2.2 Barras.....	18
2.2.3 Linhas de transmissão .....	19
2.2.4 Transformadores .....	20
2.2.5 Geradores.....	21
2.2.6 Cargas .....	21
<b>2.3 Fluxo de potência</b> .....	22
2.3.1 Aplicações do fluxo de potência .....	22
2.3.2 Formulação básica do fluxo de potência .....	23
2.3.2.1 Matriz Admitância.....	23
2.3.2.2 Equações .....	26
<b>2.4 Fluxo de Potência Linearizado</b> .....	28
2.4.1 Linearização .....	29
2.4.2 Formulação Matricial .....	30
<b>2.5 Fluxo de potência linearizado com perdas</b> .....	31
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE</b> .....	35
<b>3.1 O Software FluxPot</b> .....	35
<b>3.2 O Software Matlab R2011a</b> .....	35
<b>3.3 A ferramenta Guide</b> .....	37
<b>3.4 A Ferramenta Compiler</b> .....	38
<b>3.5 Implementação do software FluxPot</b> .....	38
3.5.1 Entrada de dados .....	39
3.5.2 Parâmetros para a simulação.....	40
3.5.3 Exibições dos resultados.....	40
<b>3.6 Interface gráfica do software FluxPot</b> .....	41
3.6.1 Entradas de dados do FluxPot.....	41
3.6.2 Saída de dados do FluxPot.....	42
<b>4 COMPROVAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE</b> .....	44
<b>4.1 Simulação do sistema de 3 barras</b> .....	44
4.1.1 Resultado da simulação do sistema de 3 barras. ....	46
<b>4.2 Simulação do sistema de 9 barras</b> .....	47
4.2.1 Resultado da simulação do sistema de 9 barras. ....	49
<b>4.3 Simulação do sistema de 14 barras</b> .....	50
4.3.1 Resultado da simulação do sistema de 9 barras. ....	52

<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	54
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

Em meados de 1890, nos Estados Unidos, foi implementada a primeira linha de transmissão em corrente alternada com uma extensão de 20,9 Km e operando com tensão abaixo de 1 kV. Em 1960 algumas linhas de transmissão ao redor do mundo já operavam na ordem de 500 kV.

Até 1917, os sistemas elétricos eram geralmente operados como unidades individuais e estes se expandiram gradualmente por todo o país. Devido a essa expansão, as demandas de grandes quantidades de potência e as necessidades de maior confiabilidade conduziram a interligação de sistemas vizinhos.

Porém, à medida que essa demanda foi aumentando, juntamente com elas as unidades geradoras e as linhas de transmissão ficaram maiores e mais numerosas e em igualdade o planejamento da operação desses sistemas exigiu maiores estudos de carga, cálculo de faltas, projetos de proteção e estabilidade do sistema.

Para a operação eficiente desses sistemas interligados é importante determinar a potência total de geração solicitada a cada instante que deve ser distribuída entre as unidades de cada usina. Determinar essa potência só é possível através dos estudos do fluxo de potência que também podem ser chamados de fluxo de carga.

O estudo do fluxo de potência consiste basicamente na determinação da tensão, da corrente, da potência e do fator de potência ou potência reativa nos diversos pontos da rede elétrica. Este estudo é fundamental para o planejamento da expansão de um sistema, uma vez que para a operação satisfatória desse sistema depende dos efeitos da interligação com outros sistemas, novas cargas, centrais geradoras e linhas de transmissão.

Antes de surgirem os computadores digitais, os estudos de fluxo de potência eram feitos em analisadores de rede CA, que seriam basicamente uma réplica em menor escala de um sistema real conectados por elementos de circuitos e fontes de tensão, porém a realização das conexões e leituras dos dados era demorada e cansativa. Com o surgimento dos computadores digitais, vieram também os primeiros aplicativos computacionais para o cálculo de fluxo de potência que aconteceram a partir de 1929.

Com o aumento de configurações mais complexas de sistemas de potência em alta tensão, surgiram problemas relacionados a desequilíbrios nas correntes e tensões do sistema. Todos estes fatores demonstravam que o planejamento detalhado da operação do sistema elétrico era necessário, e estes poderiam ser feitos através de simulações de fluxo de potência, onde diferentes cargas e redes seriam simuladas (STEVENSON, 1986).

De forma geral, as equações para o cálculo de fluxo de potência são complexas devido ao fato de envolverem grandes quantidades de cálculos e processos iterativos o que tornam as equações mais numerosas e complexas, dessa forma aumentar as chances de erros manuais.

Em outro momento, percebe-se que os alunos de graduação quando estudam fluxo de potência, geralmente têm dificuldade em entender todas as variáveis envolvidas no cálculo, entender as diferenças entre os métodos empregados e ou interpretar os resultados obtidos. Somados ao fato de não existirem muito *softwares* que auxiliem nos cálculos de fluxo de potência disponibilizados gratuitamente para alunos ou para utilização no ambiente acadêmico.

Desta forma, surge a necessidade de *softwares* mais amigáveis, de fácil acesso e que sejam mais compreensíveis pelos acadêmicos, para que assim essa barreira seja eliminada bem como o tempo gasto para os cálculos do sistema simulado possibilitando uma visualização do sistema com mais clareza.

Diante dessas dificuldades, este trabalho a fim de solucioná-las, tem como objetivo desenvolver um *software* capaz de calcular o fluxo de potência de sistemas elétricos de potência que contenham as mais variadas quantidades de barras utilizando para isso o programa Matlab como ferramenta para o desenvolvimento do mesmo. Este *software* terá licença livre para o uso acadêmico e também um manual básico de instruções para o seu uso.

Fica evidente que as simulações dos sistemas de potência são imprescindíveis para avaliar as novas demandas que uma matriz energética possui e também a necessidade da utilização de uma ferramenta com interface gráfica para cálculo do fluxo utilizando uma linguagem de programação que tenha licença pública geral está baseada na carência de materiais didáticos gratuitos que auxiliem na demonstração e compreensão do assunto. Dessa maneira os futuros profissionais da área de sistema de potência poderão observar os resultados e poderão analisá-los em face de várias condições de operação.

O trabalho desenvolvido é dividido em 5 capítulos, sendo eles:

- a) Capítulo 1: apresenta-se o tema do trabalho proposto;
- b) Capítulo 2: apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o fluxo de potência;
- c) Capítulo 3: descrevem-se o desenvolvimento do trabalho;
- d) Capítulo 4: são apresentadas as simulações para a comprovação do funcionamento do software proposto;
- e) Capítulo 5: são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos básicos relacionados ao problema do fluxo de potência e também aos sistemas elétricos de potência. Para isto foram utilizadas em sua maioria as bibliografias de Monticelli (1983) e Monticelli (2011).

Lembrando que os conceitos teóricos aqui tratados, quando aprofundados, são extremamente complexos quando aplicados aos sistemas elétricos de potência, porém como o objetivo deste trabalho não é o detalhamento dos mesmos, e sim o desenvolvimento do *software*, dessa forma as teorias aqui mencionadas serão demonstradas de forma simplificada e prática.

### 2.1 Grandezas elétricas

Nesta seção são revisadas algumas grandezas elétricas fundamentais para o equacionamento dos sistemas elétricos de potência.

#### 2.1.1 Resistência

O escoamento de cargas através de qualquer material, um fio condutor, por exemplo, encontra a oposição de uma força semelhante ao atrito mecânico. Esta oposição resultante das colisões entre os elétrons aplicados ao condutor e entre os elétrons e átomos do material é chamado de resistência elétrica.

A letra utilizada para representar a resistência elétrica é a letra R e sua unidade de medida é o ohm ( $\Omega$ ).

$$R = \text{Resistência (ohm, } \Omega \text{)}.$$

#### 2.1.2 Reatância

A reatância é uma oposição à corrente que resulta em uma troca contínua de energia entre a fonte e o campo magnético do indutor ou capacitor. Em outras palavras, a reatância, ao contrário da resistência (que dissipa energia em forma de calor), não dissipa energia (ignorando os efeitos da resistência).

A letra utilizada para representar a reatância é a letra X e sua unidade de medida é o ohm ( $\Omega$ ). Existem dois tipos de reatância: a reatância capacitiva e a indutiva.

$X_L$  = Reatância indutiva (ohm,  $\Omega$ );

$X_C$  = Reatância capacitiva (ohm,  $\Omega$ ).

### 2.1.3 Impedância

A impedância basicamente consiste o quanto um elemento “impede” a passagem de corrente assim como a resistência, porém a impedância é composta pela grandeza resistência e pela reatância indutiva ou capacitiva, assim, a impedância ainda possui um módulo e uma fase.

A letra utilizada para representar a impedância é a letra  $Z$  e sua unidade de medida é o ohm ( $\Omega$ ).

$Z$  = Impedância (ohm,  $\Omega$ );

$Z = R + jX$  (ohm,  $\Omega$ ).

Onde:

$Z$  – Impedância;

$R$  – Resistência;

$X$  – Reatância.

### 2.1.4 Admitância

A admitância é uma medida de quanto um circuito admite ou permite a passagem da corrente elétrica, ou seja, ela é contrária à impedância porque quanto maior o seu valor, maior será a corrente para a mesma tensão aplicada.

Analogamente a impedância, a admitância é composta das grandezas condutância e susceptância. Em circuitos de corrente alternada definimos a admitância como o inverso da impedância, ou seja,  $1/Z$ .

O símbolo utilizado para representar a admitância é a letra  $Y$  e sua unidade de medida é o Siemens (S).

$Y$  = Admitância (Siemens, S)

$Y = 1/Z$

$Y = G + jB$

Onde:

$Y$  – Admitância;

$G$  – Condutância;

B – Susceptância.

### 2.1.5 Condutância

A condutância é a facilidade com que o material conduz eletricidade, ou seja, ela é o inverso da resistência.

O símbolo utilizado para representar a condutância é a letra G e sua unidade de medida é o Siemens (S).

$G = \text{Condutância (Siemens, S)}$

Em termos matemáticos a condutância é definida por:

$$G = 1/R$$

Onde:

G – Condutância

R - Resistência

### 2.1.6 Susceptância

Susceptância é definido como o quanto um componente é susceptível à passagem de corrente de forma que ela é o inverso da reatância.

O símbolo utilizado para representar a susceptância é a letra B e sua unidade de medida é o Siemens (S).

Assim como a reatância, podemos ter susceptância indutiva ou capacitiva:

$B_L$  – Susceptância indutiva (Siemens, S);

$B_C$  – Susceptância capacitiva (Siemens, S).

Em termos matemáticos a condutância é definida por:

$$B_L = 1/X_L \text{ (Siemens,S)}$$

$$B_C = 1/X_C \text{ (Siemens,S)}$$

## 2.2 Sistemas elétricos de potência

Neste capítulo é apresentada uma visão geral dos componentes essenciais de um sistema elétrico de potência (SEP), tais como seus geradores, transformadores, linhas de transmissão etc.

Lembrando que a modelagem matemática das linhas, transformadores, geradores, indutâncias e capacitâncias das linhas não fazem parte do objetivo desse trabalho, uma vez que para as simulações dos sistemas nos capítulos posteriores são utilizados valores encontrados na literatura e ou fornecidos pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) em português Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos.

A figura 1 representa um sistema de potência simplificado formado por geradores, transformadores elevadores ou abaixadores, linhas de transmissão, linhas de distribuição e cargas.

Figura 1 - Sistema elétrico de potência simplificado



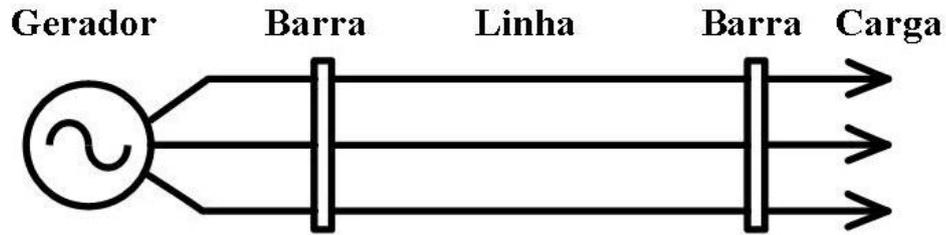
Fonte: adaptado de LEÃO, 2009.

Devido ao número elevado de componentes que um sistema elétrico possa conter, a fim de facilitar sua representação, utiliza-se a representação em forma de diagrama unifilar.

### 2.2.1 Representação unifilar

A figura 2 representa um sistema trifásico simples, onde temos um gerador alimentando uma carga através de uma linha de transmissão. Lembrando que para o cálculo do fluxo de potência considera-se que o sistema possua fases equilibradas e operem em regime senoidal permanente. Para a simplificação dos cálculos e nas representações desses sistemas utilizam-se a representação unifilar (modelo por fase).

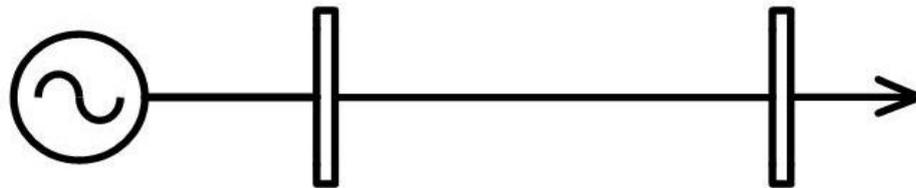
Figura 2 - Representação de um sistema trifásico.



Fonte: Monticelli (2011).

Dessa maneira nesse capítulo e nos capítulos posteriores, para a representação dos sistemas elétricos, são utilizadas as representações unifilares conforme o exemplo da figura 3.

Figura 3 - Representação sistema unifilar.



Fonte: Monticelli (2011).

### 2.2.2 Barras

Para os estudos do fluxo de potência nas redes elétricas, de forma geral utilizam-se o modelo barra-linha nos quais as barras ou também chamados de barramentos representam os nós da rede e as linhas de transmissão ou transformadores representam o elos entre esses nós. As barras de forma simplificada são condutores com resistência desprezível em comparação com as impedâncias de transformadores e linhas e isto explica sua representação ser em forma de nó elétrico nos quais a tensão é uma só em qualquer parte do condutor, neste caso a barra. A figura 4 ilustra as barras (destacado em azul) ao qual estão ligados alguns elos (linhas) e um gerador.

Figura 4 - Representação das barras.



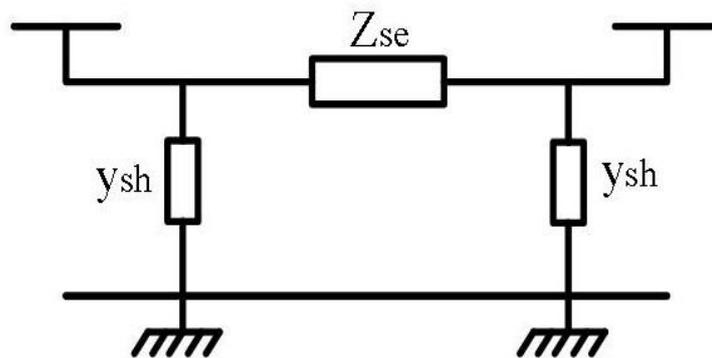
Fonte: o autor.

As barras geralmente estão localizadas em subestações e estas podem ser constituídas por inúmeras seções de barras; em um dado momento se diversas chaves ou disjuntores fechados estejam conectadas a essas barras, esse conjunto poderá formar uma única barra do ponto de vista do modelo barra-linha, ou seja, esse conjunto de conexões forma um único nó elétrico do circuito.

### 2.2.3 Linhas de transmissão

Para o cálculo do fluxo de potência e para alguns problemas relacionados, as linhas de transmissão são representadas pelo modelo  $\pi$ . Nesse tipo de modelo aparecem as barras terminais onde a linha está conectada, a impedância série ( $Z_{se}$ ), as admitâncias shunt ( $y_{sh}$ ) e a terra conforme a figura 5.

Figura 5 - Modelo  $\pi$  para linhas de transmissão.



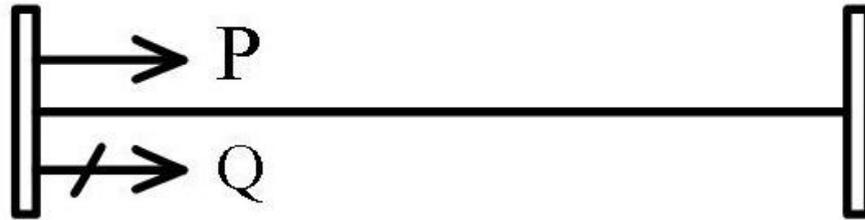
Fonte: Monticelli (2011).

As linhas de transmissão são sistemas com parâmetros diferenciados, uma vez que seus modelos matemáticos se baseiam em equações diferenciais, entretanto, para o estudo de fluxo de potência, como dito anteriormente, somente o comportamento estacionário das linhas será levado em consideração, o que torna a modelagem mais simples. Em geral, nesses estudos, o mais importante é o que ocorre nos terminais (barras) das linhas, podendo assim ignorar o que ocorre no corpo da mesma. De modo geral basta conhecermos o modelo que reproduza o comportamento da linha visto das barras terminais.

Uma característica importantíssima das linhas de transmissão é a impedância série  $z_{se} = r_{se} + jx_{se}$  e esta varia com o comprimento da linha. Ambos os parâmetros são positivos indicando que a linha dissipa potência ativa e que a reatância ( $jx_{se}$ ) é do tipo indutivo.

A figura 6 apresentada logo abaixo dá a convenção de sinais positivos para o fluxo de potência ativa e reativa em uma linha de transmissão.

Figura 6 - Convenção de sinais positivos para fluxo de potência ativa e reativa.



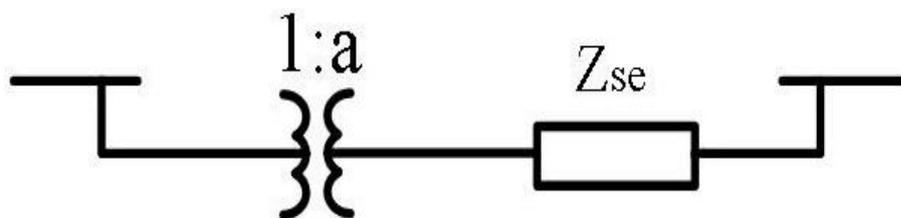
Fonte: Monticelli (2011).

O fluxo é considerado como positivo quando ele sai da barra, porém a potência ativa poderá ter sentido diferente da potência reativa dependendo das condições de operação da linha.

#### 2.2.4 Transformadores

A figura 7 logo demonstra o modelo unifilar de um transformador. O modelo é constituído de duas partes principais: um transformador ideal com relação de transformação  $1:a$  e uma impedância série  $Z_{se} = r_{se} + jx_{se}$ . Os transformadores de potência em sua maioria, tanto o  $x_{se}$  quanto o  $r_{se}$  são positivos nos levando-nos a perceber que o transformador apresenta perdas de potência ativa e que a potência reativa é do tipo indutiva.

Figura 7 - Modelo unifilar de um transformador



Fonte: Monticelli (2011).

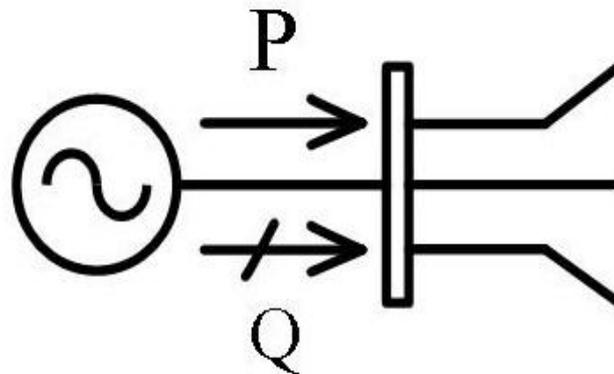
A relação de transformação apresentada anteriormente é utilizada em transformadores reguladores onde estes permitem a variação do *tap*. Nos transformadores mais usuais, também chamados de transformadores em fase, o *tap* é uma grandeza escalar. Ainda de acordo com a figura 7, um acréscimo no valor do *tap*  $a$  tende a aumentar o valor da tensão no terminal oposto.

### 2.2.5 Geradores

Em problemas de cálculo de fluxo de potência normalmente são especificadas as tensões desejadas para a operação do gerador e calculadas as injeções de potência reativa. Esses valores calculados devem obedecer a limites máximos e mínimos de geração de potência reativa. Nos estudos de fluxo de potência convencional onde se admite rede e carga equilibradas, e por isso só se modelam os elementos em termos de sua sequência positiva, os geradores são comumente representados por uma força eletromotriz constante em módulo e uma potência ativa injetada na barra terminal (que na maioria das vezes é a barra de alta tensão da usina, mas que também pode ser a barra de baixa tensão nos casos em que houver interesse em representar os transformadores elevadores).

A figura 8 representa o modelo unifilar de um gerador conectado a uma barra e esta conectada a três linhas.

Figura 8 - Modelo unifilar de um gerador.



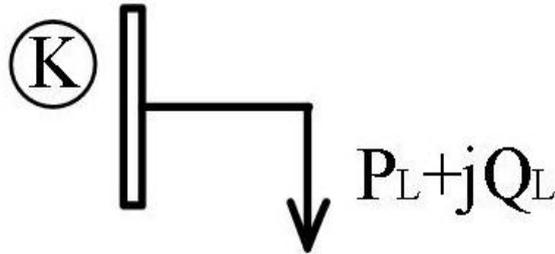
Fonte: Monticelli (2011).

### 2.2.6 Cargas

Dentre todos os componentes descritos anteriormente a carga de certa forma é um componente que oferece maiores dificuldades para a sua modelagem devido ao fato das mesmas representarem agregados de consumidores que por sua vez podem conter motores de indução, sistemas de aquecimentos, iluminação dentre outros sistemas. A representação da carga depende muito do tipo de estudo realizado e para o estudo do fluxo de potência a carga pode ser representada por potência constante, porém ainda se torna importante conhecer a variação das potências ativas e reativas com a variação da tensão.

A figura 9 representa o modelo unifilar para a representação da carga.

Figura 9 - Modelo unifilar de uma carga.



Fonte: Monticelli (2011).

## 2.3 Fluxo de potência

O cálculo do fluxo de potência em uma rede de energia elétrica consiste basicamente na análise ou na avaliação do estado da rede em regime permanente, ou seja, em uma condição estática. Essa situação é representada devido às variações do tempo serem lentas o suficiente para que os efeitos transitórios sejam desprezados. Nessa modelagem a rede é representada por um conjunto de equações algébricas que de modo geral são realizadas com o auxílio de ferramentas computacionais.

### 2.3.1 Aplicações do fluxo de potência

A análise do fluxo de potência segundo Canossa (2007) tem como objetivos principais:

- a) Segurança: a simulação do fluxo de potência é eficiente para estimativas nos limites de operação, sendo possível detectar problemas futuros para que não haja a perda de transmissão de energia ou perda de estabilidade.
- b) Planejamento e operação: a análise do fluxo de potência é importante na avaliação de novas configurações do sistema para atender um possível aumento de demanda dentro de seus limites. Trabalha também no estudo de configurações que possibilitem menores perdas de operação do sistema elétrico.
- c) Simulação de sistemas elétricos: simulações podem ser geradas sob condições anormais de operação, sejam elas decorrentes da operação de equipamentos como transformadores, unidades geradoras ou linhas de transmissão, ou ainda simulação de saída desses

equipamentos ocasionado por manutenções preventivas, corretivos ou ainda por desligamento automático causados por descargas atmosféricas.

### 2.3.2 Formulação básica do fluxo de potência

Na formulação básica do problema, a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram como dados e duas como incógnitas:

$V_k$  - Magnitude da tensão nodal na barra  $k$ ;

$\theta_k$  - Ângulo da tensão nodal na barra  $k$ ;

$P_k$  - Potência ativa líquida calculada na barra  $k$ ;

$Q_k$  - Potência reativa líquida calculada na barra  $k$ .

Dependendo de quais variáveis entram como dados e quais são consideradas incógnitas, podem ser definidas três tipos de barras.

a) Barra de carga ou barra PQ:

São dados  $P_k$  e  $Q_k$ ;

São calculados  $V_k$  e  $\theta_k$ ;

b) Barra de geração ou barra PV:

São dados  $P_k$  e  $V_k$ ;

São calculados  $Q_k$  e  $\theta_k$ ;

c) Barra de referência ou barra V $\theta$ :

São dados  $V_k$  e  $\theta_k$ ;

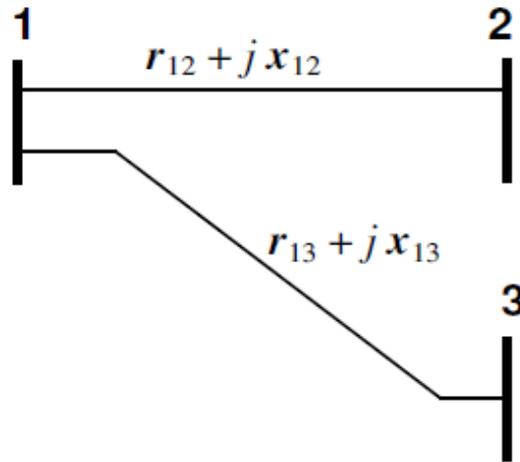
São calculados  $P_k$  e  $Q_k$ ;

#### 2.3.2.1 Matriz Admitância

A determinação do Fluxo de Potência depende, entre outros fatores, dos elementos da matriz de admitância das barras do sistema. Os elementos da matriz de admitância são

determinados em função dos parâmetros da rede. Para exemplificar, considera-se um sistema de potência de três barras, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Sistema exemplo de três barras



Fonte: Antunes (2007).

Sejam as admitância série  $y_a$  e  $y_b$  definidas pelas equações 1 e 2:

$$y_a = \frac{1}{r_{12} + j \cdot x_{12}} \quad (1)$$

$$y_b = \frac{1}{r_{13} + j \cdot x_{13}} \quad (2)$$

Onde:

$r_{12}$  Resistência série da linha 1-2;

$x_{12}$  Reatância indutiva série da linha 1-2;

$r_{13}$  Resistência série da linha 1-3;

$x_{13}$  Reatância indutiva série da linha 1-3.

Cada linha possui ainda os elementos *shunt*, que são as susceptâncias capacitivas da linha para a terra. Deste modo, as admitâncias para a terra deste sistema estão de acordo com as equações 3 e 4:

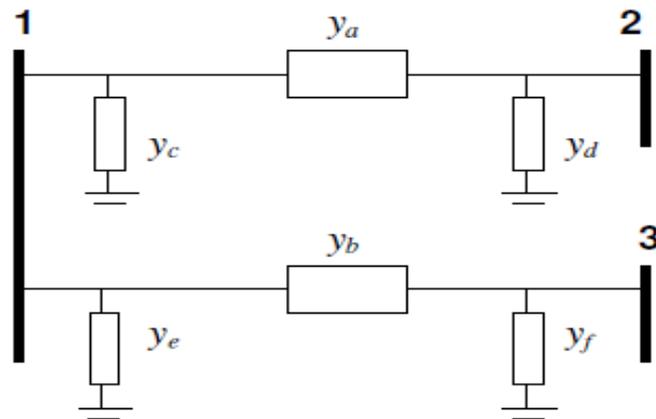
$$y_c = y_d = j \frac{B_{12}}{2} \quad (3)$$

$$y_e = y_f = j \frac{B_{13}}{2} \quad (4)$$

Sendo  $B_{12}$  e  $B_{13}$  as susceptâncias capacitivas das linhas 1-2 e 1-3, respectivamente.

Então, representando as linhas do sistema de três barras da Figura 10 pelo modelo  $\pi$ , têm-se o sistema da Figura 11.

Figura 11 - Sistema exemplo de 3 barras



Fonte: Bueno (2012).

Para este sistema, a matriz de admitância das barras é definida pela equação 5:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_a + y_b + y_c + y_e & -y_a & -y_b \\ -y_a & y_a + y_d & 0 \\ -y_b & 0 & y_b + y_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

Desta forma, os elementos de uma matriz de admitância para um sistema de  $n$  barras podem ser descritos pelas equações 6 e 7.

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (6)$$

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} + y_{ig} \quad (7)$$

Onde:

$Y_{ij}$ : Admitância série da linha  $i$ - $j$ , sendo que  $j$  corresponde a todas as barras conectadas à barra  $i$ ;

$y_{ig}$ : Admitância para a terra, a qual se reduz à susceptância capacitiva  $jB_c$ .

Os elementos da matriz de admitância das barras podem ainda ser descritos em termos de suas partes reais e imaginárias, segundo a equação 8:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (8)$$

Onde as variáveis significam:

$G_{ij}$  Parte real do elemento i-j da matriz de admitância de barras;

$B_{ij}$  Parte imaginária do elemento i-j da matriz de admitância de barras.

### 2.3.2.2 Equações

As equações que modelam o problema do fluxo de potência são duas para cada barra do sistema, uma para a potência ativa e outra para a potência reativa. Ambas as equações são baseadas na Primeira Lei de Kirchhoff, na qual o somatório de potências ativas ou reativas que são injetadas em uma barra é igual ao somatório das potências ativas ou reativas que saem da barra. As expressões que definem a injeção de potência ativa e injeção de potência reativa são descritas nas equações 9 e 10 abaixo:

$$P_k(V, \theta) = V_k \cdot \sum_{m=1}^{NB} (G_{km} \cdot \cos\theta_{km} + B_{km} \cdot \sin\theta_{km}) \cdot V_m \quad (9)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \cdot \sum_{m=1}^{NB} (G_{km} \cdot \sin\theta_{km} - B_{km} \cdot \cos\theta_{km}) \cdot V_m \quad (10)$$

Onde os índices e as variáveis significam:

$P_k(V, \theta)$  Injeção de potência ativa na barra k;

$Q_k(V, \theta)$  Injeção de potência reativa na barra k;

$k = 1 \dots NB$  sendo NB o número de barras do sistema;

$V_k, V_m$  Módulo das tensões das barras k e m;

$\theta_{km}$  Defasagem angular entre as barras k e m;

$G_{km}$  Parte real do elemento k-m da matriz de admitância de barra;

$B_{km}$  Parte imaginária do elemento k-m da matriz de admitância de barra.

Nestas equações, a defasagem angular  $\theta_{km}$  é calculado pela diferença  $\theta_k - \theta_m$  logo, pode-se adicionar ou subtrair uma constante arbitrária a todos os ângulos das tensões que,

obtém-se o mesmo resultado na resolução do problema dos fluxos de potência. Deste vem à necessidade da barra de referência. Portanto, conclui-se que deve ser adotado um ângulo de tensão como referência para todo o sistema.

O cálculo do fluxo de potência nos ramos da rede elétrica são descritas pelas equações 11,12,13 e 14 descritas abaixo:

$$P_{km} = (a_{km} \cdot V_k)^2 \cdot g_{km} - (a_{km} \cdot V_k) \cdot V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (11)$$

$$Q_{km} = -(a_{km} \cdot V_k)^2 \cdot b_{km}^{sh} + (a_{km} \cdot V_k) \cdot V_m [b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (12)$$

$$P_{mk} = V_m^2 \cdot g_{mk} - (a_{km} \cdot V_k) \cdot V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (13)$$

$$P_{km} = -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) - (a_{km} \cdot V_k) \cdot V_m [-b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (14)$$

Onde os índices e as variáveis significam:

$V_k$  Fasor tensão da barra k;

$\theta_k$  Ângulos da tensão nas barras k;

$\theta_{km}$  Diferença entre os ângulos das barras m e k, ou também chamada de abertura angular entre as barras m e k;

$P_{km}$  Fluxo de potência ativa da barra k em direção à barra m;

$P_{mk}$  Fluxo de potência ativa da barra m em direção à barra k;

$Q_{km}$  Fluxo de potência reativa da barra k em direção à barra m;

$Q_{mk}$  Fluxo de potência reativa da barra m em direção à barra k;

$a_{km}$  Relação de transformação de um transformador entre as barras k e m;

$b_{km}^{sh}$  Susceptância capacitiva da linha de transmissão entre as barras k e m.

Os parâmetros  $g_{km}$  e  $b_{km}$  são definidos respectivamente como sendo a condutância e susceptância indutiva do ramo entre as barras k e m, e podem ser calculados em função de  $r_{km}$  e  $x_{km}$  segundo as equações 15 e 16.

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (15)$$

$$b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (16)$$

Onde os índices e as variáveis significam:

$r_{km}$  Resistência série da linha k-m ;

$x_{km}$  Reatância indutiva série da linha k-m.

Para as linhas de transmissão  $a_{km} = 1$  e  $\phi_{km} = 0$ . Para transformadores em fase,  $b_{km}^{sh} = 0$  e  $\phi_{km} = 0$ . Para transformadores defasadores puros,  $b_{km}^{sh} = 0$  e  $a_{km} = 1$ . E por fim para os transformadores defasadores,  $b_{km}^{sh} = 0$ .

De forma geral esse capítulo descreve o problema do fluxo de potência em estudos de redes elétricas. É apresentada a formulação básica deste problema elétrico, além de uma descrição sucinta da Matriz de admitância, que representa os parâmetros da rede elétrica. As equações gerais para o cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede são detalhadas.

## 2.4 Fluxo de Potência Linearizado

O fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão é aproximadamente proporcional à abertura angular na linha e se desloca no sentido dos ângulos maiores para os ângulos menores e essa relação se assemelha aos fluxos de corrente com as quedas de tensão em um circuito de corrente contínua (CC) onde para este circuito é válida a lei de ohm. Essa semelhança possibilita o desenvolvimento de um modelo aproximado para o fluxo de potência chamado de fluxo de potência linearizado ou fluxo de potência CC (ou DC no inglês). Este método quando usado com o auxílio de ferramentas computacionais permite estabelecer com baixo esforço da ferramenta e com uma precisão aceitável a distribuição do fluxo de potência em redes de transmissão de energia. Este modelo tem ótimas aplicações para análises de sistema de potência, sendo elas para o planejamento ou para a operação desses sistemas.

O fluxo de potência linearizado é baseado no acoplamento entre as variáveis  $P$  e  $\theta$  (potência ativa e ângulo) e quanto maiores forem os níveis de tensão do sistema melhores são seus resultados, no entanto, esse modelo não é aplicável em sistema de baixa tensão devido ao fato do fluxo de potência depender de maneira significativa das quedas de tensão. Para este tipo de problema são utilizados modelos linearizados em outras características da rede que não sejam da relação  $P$  e  $\theta$ .

O modelo linearizado não pode substituir por completo os métodos não lineares também utilizados para o cálculo do fluxo de potência porque este não leva em conta as

magnitudes das tensões nodais e as potências reativas do sistema, porém ressalta-se que este modelo possui grande utilidade em fases iniciais de estudos em sistemas numerosos. Em fases mais avançadas do estudo, se for necessário conhecer o valor das tensões, por exemplo, outros métodos clássicos poderão ser utilizados.

### 2.2.1 Linearização

Considere o fluxo de potência ativa  $P_{km}$  em uma linha de transmissão, dado pela expressão 17:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (17)$$

O fluxo no extremo oposto da linha é demonstrado pela equação 18:

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (18)$$

Visto que as perdas nas linhas de transmissão são dadas pela equação 19:

$$P_{km} + P_{mk} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (19)$$

Se os termos correspondentes às perdas forem desprezados nas expressões de  $P_{km}$  e  $P_{mk}$ , ter-se-á de acordo com a equação 20.

$$P_{km} = -P_{mk} = -V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (20)$$

As seguintes aproximações descritas pelas equações 21 propostas por Monticelli (1983) podem ainda ser introduzidas em 20:

$$\begin{aligned} V_k &\cong V_m \cong 1 \text{ pu} \\ \sin \theta_{km} &\cong \theta_{km} \\ b_{km} &\cong \frac{-1}{x_{km}} \end{aligned} \quad (21)$$

O fluxo  $P_{km}$  pode então ser aproximado pela equação 22:

$$P_{km} = x_{km}^{-1} \theta_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (22)$$

Esta equação tem a mesma forma que a Lei de Ohm aplicada a um resistor percorrido por corrente contínua, sendo  $P_{km}$  análogo à intensidade da corrente;  $\theta_k$  e  $\theta_m$  análogos às tensões terminais; e  $x_{km}$  análogo à resistência. Por esta razão, o modelo da rede de transmissão baseado na relação da equação 22 é também conhecido como Modelo CC.

Considere-se agora o fluxo de potencia ativa  $P_{km}$  em um transformador em-fase, dado pela expressão 23 deduzida anteriormente:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m g_{km} \cos \theta_{km} - (a_{km} V_k) V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (23)$$

Desprezando-se os termos correspondentes às perdas e introduzindo-se as aproximações da equação 22 chega-se a expressão 24:

$$P_{km} = a_{km} x_{km}^{-1} \theta_{km} \quad (24)$$

Sendo que  $a_{km}$  pode ser ainda aproximado por  $a_{km} \cong 1$ , caso em que a expressão do fluxo de potência ativa no transformador se reduz à expressão 24 válida para linhas de transmissão.

O fluxo de potência ativa  $P_{km}$  em um defasador puro é dado pela expressão 25:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \quad (25)$$

Desprezando-se os termos correspondentes às perdas e considerando-se  $V_k = V_m = 1$  pu e  $b_{km} = x_{km}^{-1}$  chega-se a equação 26 abaixo:

$$P_{km} = x_{km}^{-1} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \quad (26)$$

### 2.2.2 Formulação Matricial

O modelo linearizado desenvolvido anteriormente pode ser expresso matricialmente por uma equação do tipo  $I=YE$ . Para maior simplicidade de exposição, considere-se inicialmente uma rede de transmissão sem transformadores em-fase ou defasadores. Neste caso, os fluxos de potência ativa nos ramos da rede são dados pela equação 27:

$$P_{km} = x_{km}^{-1} \theta_{km} \quad (27)$$

Em que  $x_{km}$  é a reatância de todas as linhas em paralelo que existem no ramo  $k - m$ .

A injeção de potência ativa na barra  $k$  é igual a soma dos fluxos que saem da barra, segundo a equação 28:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \theta_{km} \quad (K = 1, NB) \quad (28)$$

Esta expressão pode ser colocada na forma da equação 29.

$$P_k = \left( \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \right) \theta_k + \sum_{m \in \Omega_k} (-x_{km}^{-1} \theta_m) \quad (29)$$

Que por sua vez admite uma expressão matricial do tipo descrita na equação 30:

$$\underline{P} = B' \underline{\theta} \quad (30)$$

Em que:

$\underline{\theta}$  vetor dos ângulos das tensões nodais em  $\theta_k$ ;

$\underline{P}$  vetor das injeções líquidas de potência ativa;

$B'$  matriz tipo admitância nodal e cujos elementos são segundo a equação 31:

$$\begin{aligned} B'_{km} &= -x_{km}^{-1} \\ B'_{kk} &= \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \end{aligned} \quad (31)$$

## 2.5 Fluxo de potência linearizado com perdas

Em redes de transmissão com dimensões elevadas o montante das perdas de transmissão pode ser muito grande quando comparado com o nível de geração da barra de referência (ou barra de folga). Por exemplo, perdas totais de 500 MW para um nível de geração na barra de referência de 1000 MW. Em situações como esta, os fluxos estimados

pelo modelo CC nas linhas que estão ligadas diretamente à barra de referência, ou estão em suas proximidades, podem apresentar erros muito elevados (100% por exemplo) devido à não consideração das perdas de transmissão e da conseqüente redução da geração da barra de referência (por exemplo, em vez de gerar 1000 MW, gera apenas 500 MW). Visto de outra forma, pode-se dizer que as perdas correspondem a cargas distribuídas por todo o sistema, e que são atendidas pela barra de referência. Isto porque, na formulação usual do fluxo de carga CA, a injeção de potência ativa na barra de referência não é especificada, sendo dada pelas perdas de transmissão (só conhecidas após a resolução do problema) mais a carga líquida de todas as demais barras do sistema (cargas menos geração). Nesta seção será apresentada uma maneira de se incluir o efeito das perdas de transmissão no Modelo CC utilizando um modo aproximado e de baixo custo computacional.

Considere mais uma vez a expressão da potência ativa  $P_k$  deduzida anteriormente e reescrita a seguir segundo a equação 32:

$$P_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (32)$$

Em que  $k$  é o conjunto das barras vizinhas da barra  $k$ , incluindo-se a própria barra  $k$ . Aproximando-se as magnitudes das tensões nodais por 1 pu e rearranjando-se o somatório, obtém-se a equação 33.

$$P_k = G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (33)$$

Em que  $\Omega_k$  é o conjunto das barras vizinhas da barra  $k$ , excluindo-se a própria barra  $k$ . Considerando-se que a equação 34 seja:

$$\begin{aligned} G_{km} &= -g_{km} \\ G_{kk} &= \sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \\ B_{km} &\cong x_{km}^{-1} \end{aligned} \quad (34)$$

Obtém-se a equação 35.

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} (1 - \cos\theta_{km}) g_{km} + \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \text{sen}\theta_{km} \quad (35)$$

Aproximando-se a equação 36:

$$\begin{aligned} \cos\theta_{km} &\cong 1 - \frac{\theta_{km}^2}{2} \\ \text{sen}\theta_{km} &\cong \theta_{km} \end{aligned} \quad (36)$$

Obtém-se, finalmente a equação 37:

$$P_k - \frac{1}{2} \sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \theta_{km}^2 = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} \theta_{km} \quad (37)$$

Analisando-se a expressão das perdas de transmissão na linha k-m segundo a equação 38.

$$\text{Perdas} = P_{km} + P_{mk} = g_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}) \quad (38)$$

E fazendo-se  $V_k = V_m = 1$  p.u. e aproximando-se  $\cos\theta$  por  $1 - \theta_{km}^2/2$ , obtém-se a equação 39.

$$\text{Perdas} = P_{km} + P_{mk} = g_{km} \theta_{km}^2 \quad (39)$$

Portanto, o lado esquerdo da equação 38 é dado da injeção líquida de potência ativa na barra 1 menos a metade das perdas ativas de todas as linhas adjacentes a esta barra. Ou seja, o efeito das perdas pode ser representado aproximadamente como cargas adicionais obtidas dividindo-se as perdas de cada linha do sistema entre suas barras terminais obtidas (metade de cada lado). Desta forma o Modelo CC passa a assumir a forma da equação 40:

$$P + P_{\text{perdas}} = B' \theta \quad (40)$$

Ou seja, o novo modelo é obtido a partir do modelo original ( $P = B'\underline{\theta}$ ), adicionando-se o vetor o vetor  $P^{\text{perdas}}$  ao vetor das injeções nodais das potências ativa.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE*

Este capítulo apresenta a estrutura básica do desenvolvimento do *software* proposto para este trabalho e que por razões autorais foi nomeado como FluxPot. Nas seções seguintes são apresentados os conceitos básicos da linguagem de programação utilizada, a estrutura básica, o seu funcionamento e a tela principal de navegação (*Interface*).

#### 3.1 O *Software* FluxPot

Como mencionado nos capítulos anteriores, este trabalho propôs a criação do *software* FluxPot que tem como finalidade principal calcular o fluxo de potência em sistemas elétricos de potência, cuja funcionalidade atende a necessidade de uma entrada de dados facilitada, bem como uma boa visualização dos resultados.

Para o desenvolvimento do *software*, diversas teorias estudadas nas universidades de engenharia elétrica são utilizadas: cálculo numérico, máquinas elétricas, circuitos elétricos, sistemas de potência, linguagem de programação, dentre outras.

Procurou-se desenvolver o *software* a fim de que este funcione de maneira clara, objetiva e que funcione independentemente do Matlab, ou seja, para que o usuário não precise possuir o Matlab para a sua utilização.

#### 3.2 O *Software* Matlab R2011a

O Matlab (*MATrixLABoratory*) é um *software* que possui uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo de programação, que permite o desenvolvimento de aplicações complexas e computacionalmente exigentes de forma mais rápida do que utilizando as linguagens tradicionais, como por exemplo as linguagens C e C++.

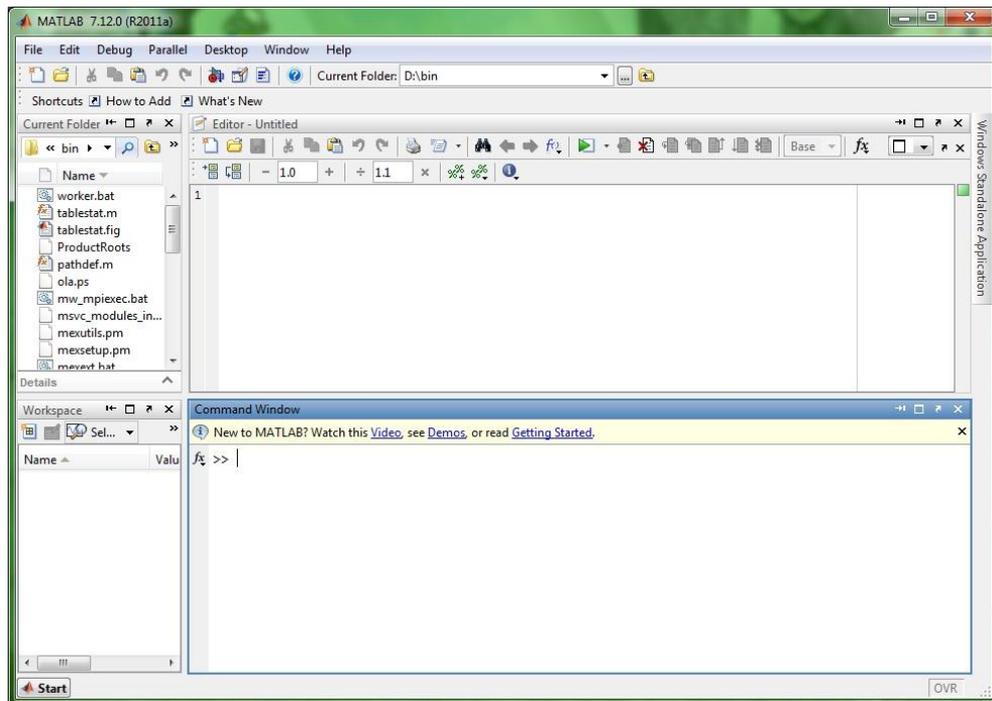
O Matlab é usado também como ferramenta fundamental ao longo do desenvolvimento de algoritmos, redes neurais, análise de dados, computação numérica, desenvolvimento e investigação de projetos aeroespaciais, telecomunicações, eletrônica e indústrias de automação industrial e automotiva. Ele permite também a concepção e desenvolvimento de uma vasta gama de produtos avançados, incluindo sistemas automotivos, sistemas de telecomunicações, controle de voo aeroespacial. Mais de 5000 faculdades e universidades em todo o mundo usam Matlab para o ensino e pesquisa em uma ampla gama de disciplinas técnicas. (MATLAB, 2016).

As seguintes considerações resumem as vantagens do Matlab como linguagem de programação escolhida para o presente trabalho:

- a) É uma linguagem comercial de alto nível e amplamente difundida nos cursos de engenharia;
- b) Apresenta uma estrutura de dados na forma de matrizes;
- c) Apresenta a disponibilidade de processos numéricos de alta qualidade;
- d) Apresenta um ambiente de visualização e programação simples;
- e) Possui recursos para o desenvolvimento de interfaces gráficas poderosas;
- f) Inclui uma vasta seleção de ferramentas que auxiliam o programador.

A figura 12 ilustra o ambiente de trabalho do *software* Matlab.

Figura 12 - Ambiente de trabalho do *software* Matlab



Fonte: o autor.

Portanto, o Matlab não só é um *software* interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico e científico, como também integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em um ambiente fácil de usar, onde problemas e soluções podem ser expressos como eles são escritos na matemática ou na forma de uma linguagem de programação.

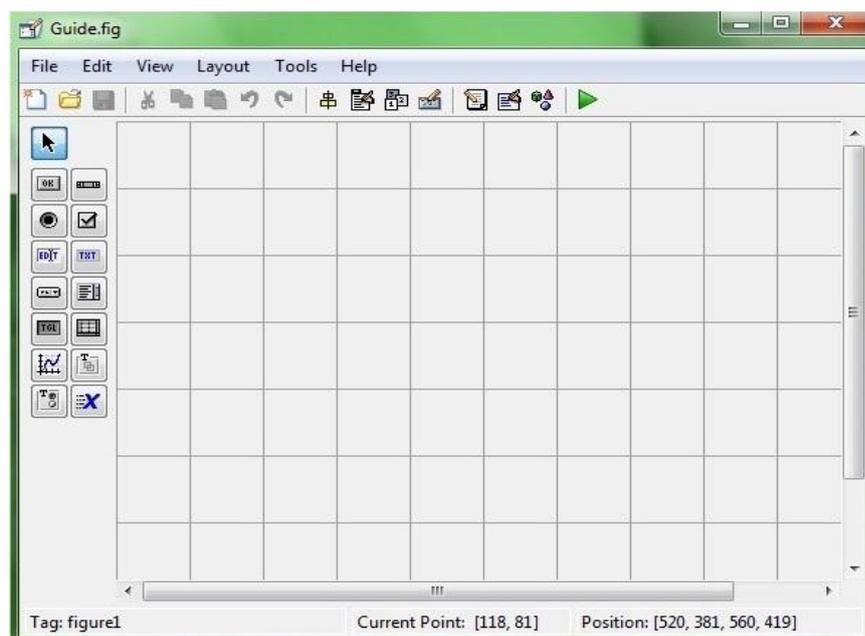
### 3.3 A ferramenta Guide

A ferramenta Guide (Graphical User Interface Development Environment) ou Interface Gráfica do Usuário no Ambiente de Desenvolvimento está presente no *software* Matlab e esta ferramenta fornece um conjunto de aplicações para a criação de interfaces gráficas de usuário (Gráfica User Interfaces - GUIs). Esta ferramenta simplifica muito o processo de concepção e construção de interfaces gráficas em novos aplicativos ou *softwares*.

Dois características que se destacam e que auxiliam o programador para a execução de tarefas quando se usa a ferramenta Guide:

- a) Layout do GUI: usando o GUI, você pode estabelecer uma nova janela clicando e arrastando componentes, tais como painéis, botões, campos de texto, controles deslizantes, menus, e assim por diante para a área de layout;
- b) Programação no GUI: a programação feita no GUI gera automaticamente um arquivo de programa MATLAB que controla como o programa irá operar. O código nesse arquivo inicializa o GUI e inclui modelos de função para os retornos mais utilizados para cada componente dos comandos que são executados quando um usuário clica em um componente. Usando o editor de rotinas do Matlab, você pode adicionar códigos para os retornos de chamada para execução das funções desejadas (MATHWORKS, 2016). A figura 13 ilustra a tela principal da ferramenta Guide.

Figura 13 - Tela principal da ferramenta Guide



Fonte: o autor

Visto isso a ferramenta Guide torna-se importantíssima para a criação do layout em *softwares*.

### 3.4 A Ferramenta *Compiler*

Toda a arquitetura e o desenvolvimento do *software* FluxPot foi elaborada através do *software* Matlab, no entanto, não há dependência do programa em relação ao Matlab para seu funcionamento. A arquitetura utilizada permite total dissociação entre FluxPot e Matlab, tornando a utilização do FluxPot totalmente transparente ao usuário.

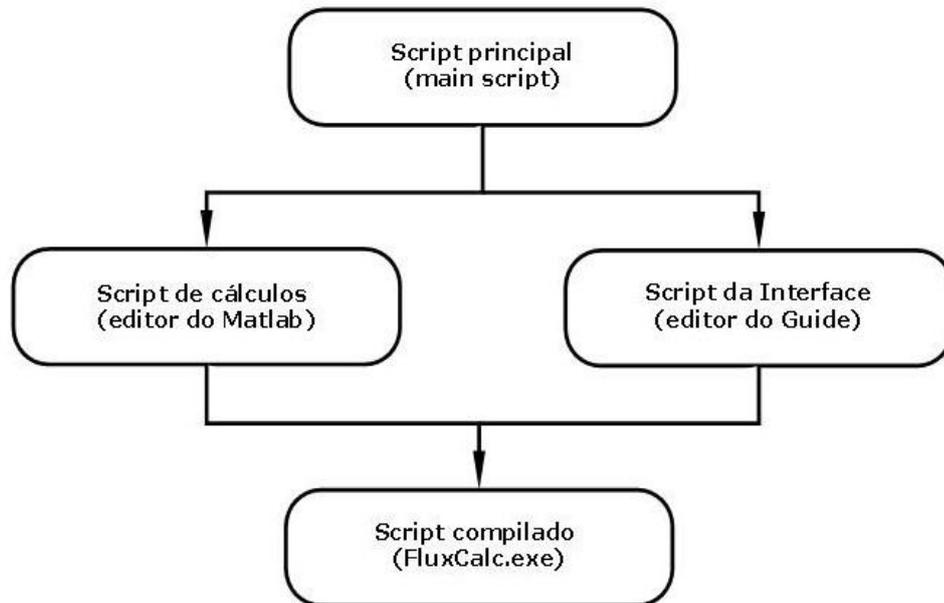
Esta arquitetura é viabilizada com o uso do Matlab *Compiler*, que permite transformar uma rotina do Matlab em um programa executável em linguagem C ou executável do tipo ‘.exe’. O compilador é a última ferramenta do Matlab a ser utilizada uma vez que todas as rotinas estejam terminadas juntamente com as imagens e layouts estejam incorporados ao código principal do Matlab, por fim a rotina pode ser convertida em um programa em linguagem C ou executável.

### 3.5 Implementação do *software* FluxPot

Para a implementação do *software* FluxPot, inicialmente sua estruturada foi montada em quatro pacotes de dados principais:

- a) *Script* principal (*main*): é a classe principal onde estão contidos todos os *scripts* e pacotes;
- b) *Script* do Matlab: onde são realizados os cálculos do fluxo de potência;
- c) *Script* do Guide: onde são feitas as comunicações com arquivos externos através de seu *script* exclusivo;
- d) *Script* compilado: onde são realizadas todas as rotinas anteriores sem a necessidade do Matlab. A Figura 14 exhibe a estrutura mencionada.

Figura 14 - Estrutura do software FluxPot



Fonte: o autor

### 3.5.1 Entrada de dados

Em termos didáticos, normalmente adotam-se sistemas de pequeno porte no estudo do problema de fluxo de potência. Pode-se dizer que durante a exposição, professores costumam utilizar sistemas de no máximo 5 barras, enquanto em trabalhos ou estudos mais elaborados, utilizam sistemas cuja dimensão ultrapassam 200 barras. Também é comum, durante o estudo de um determinado sistema, que se queira efetuar alterações nos dados visando demonstrar ou verificar algum efeito no sistema.

A entrada de dados atende aos seguintes requisitos:

- a) O software contém uma *interface* de entrada de dados no estilo tabela;
- b) Através *interface* é possível abrir e editar arquivos previamente salvos pelo modo *default*;
- c) Os dados serão divididos em dados de barra, dados de geração e dados de linha (ramos).
- d) Possui 2 sistemas teste 3 um sistema real de 14 barras do IEEE.

Não faz parte da primeira versão deste trabalho:

- a) Ferramenta para desenho do sistema;
- b) Leitura de arquivos de dados em formato de texto ou planilha.

### 3.5.2 Parâmetros para a simulação

Em simulações convencionais, a adoção dos parâmetros de simulação recai normalmente em valores “tradicionais” de forma que o procedimento de cálculo (execução do algoritmo) pode ser transparente ao usuário.

O FluxPot possui o seguinte parâmetro de simulação passíveis de alteração pelo usuário:

a) Algoritmo de cálculo: algoritmo de fluxo de potência através da formulação linearizada ou formulação linearizada com perdas.

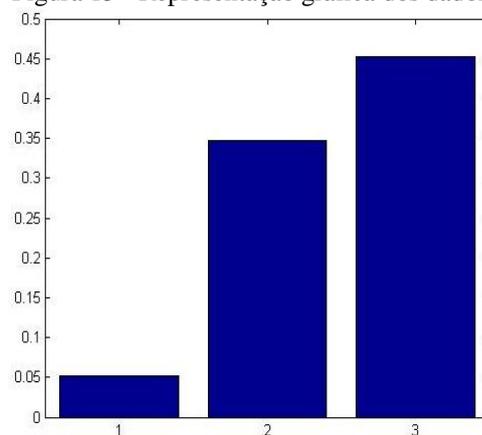
### 3.5.3 Exibições dos resultados

Esta é a principal função a ser trabalhada. A exibição dos resultados de uma forma clara e de fácil compreensão representa o principal diferencial para a compreensão e auxílio aos docentes na exposição do tema.

A exibição dos resultados para o software em questão é feita através de dois métodos:

a) Gráficos: os gráficos são uma forma familiar de representação para engenheiros e que tem grande poder de síntese de grandes quantidades de dados e de representação de conjuntos de dados complexos. A figura x representa um gráfico gerado na simulação de um sistema de 3 barras.

Figura 15 - Representação gráfica dos dados



Fonte: o autor

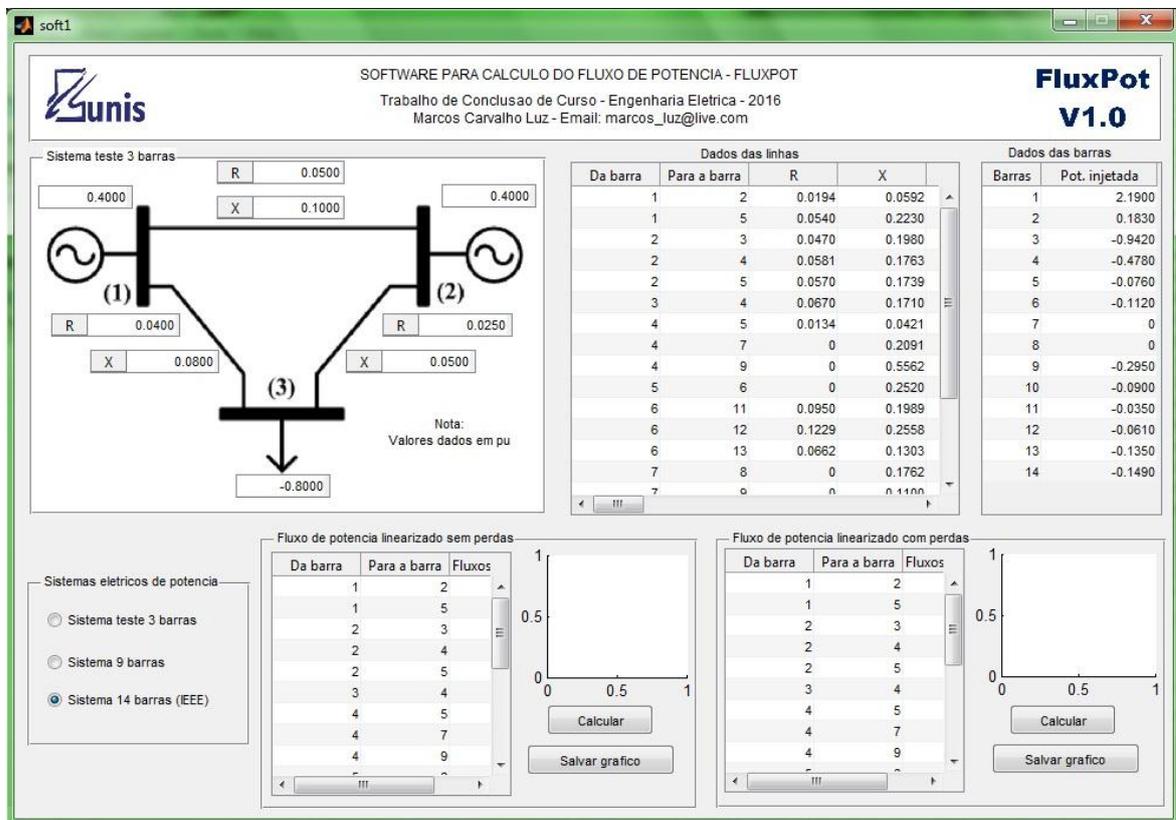
b) Tabelas: através da tabela é possível visualizar com maior precisão os resultados do cálculo efetuado e os valores contidos nelas podem ser copiados e colados em outros documentos de interesse.

Outra funcionalidade implementada no programa de grande valor para o proposta é a possibilidade de salvar os gráficos nos formatos de figuras do “bmp” (*Bitmap*) ou “jpg” (*JPEG*).

### 3.6 Interface gráfica do software FluxPot

Nessa subseção são apresentada as principais ferramentas contidas na *interface* gráfica (figura 16) do *software* FluxPot.

Figura 16 - tela principal do *software* FluxPot



Fonte: o autor.

#### 3.6.1 Entradas de dados do FluxPot

Na tela inicial do software nota-se um sistema elétrico de três barras, dois geradores, três linhas de transmissão e uma carga. Este é o sistema teste de 3 barras proposto para este trabalho que servirá para comprovação do funcionamento do sistema e também auxiliar no aprendizado do acadêmico quanto ao funcionamento de sistemas elétricos.

Assim que o software é inicializado, os valores iniciais (*default*) são pré-visualizados no sistema teste de três barras, porém se o usuário desejar os valores pré-carregados podem ser editados. Na figura 16 são demonstradas as áreas destinadas à inserção dos dados de entrada.

Figura 17 - Entrada de dados

The screenshot displays the FluxPot V1.0 software interface. At the top, it identifies the software as 'SOFTWARE PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA - FLUXPOT' by Marcos Carvalho Luz. The main window is divided into several sections:

- Top Left:** A schematic diagram of a 3-bus system with three voltage sources (1, 2, and 3) and their respective impedances and reactances.
- Top Right:** Two data tables. The first table, 'Dados das linhas', shows line parameters between buses. The second table, 'Dados das barras', shows bus parameters.
- Bottom Left:** A section for selecting a power system from a library, with three radio buttons: 'Sistema teste 3 barras', 'Sistema 9 barras', and 'Sistema 14 barras (IEEE)'. The first option is selected.
- Bottom Right:** Two panels for power flow calculation, each with a graph area and a 'Calcular' button.

Red arrows point from text labels to specific areas in the interface:

- 'Área destinada a simulação do sistema teste de 3 barras' points to the schematic diagram.
- 'Sistemas de potência inclusos na biblioteca do software' points to the system selection radio buttons.
- 'Área com os dados das linhas e barras do sistema escolhido ou editado' points to the data tables.

Fonte: o autor.

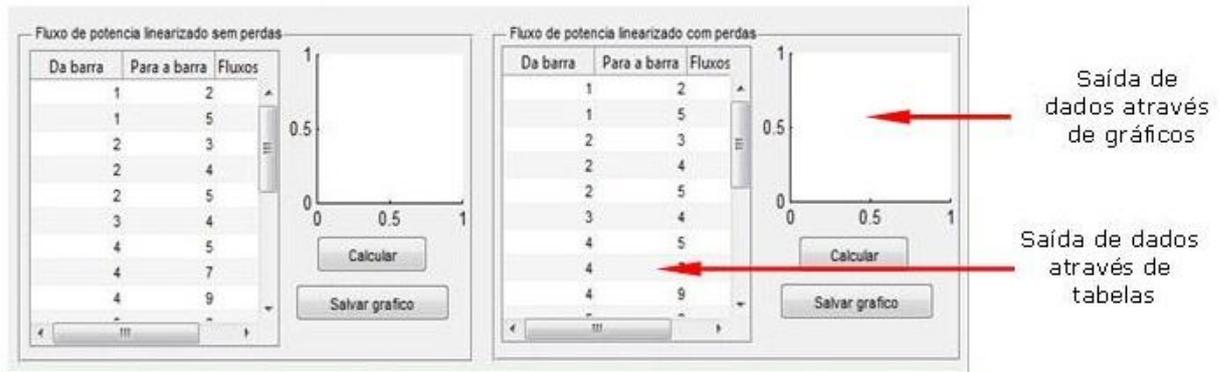
Ainda de acordo com a figura 16, é detalhado o funcionamento das entradas de dados nos itens a, b e c

- Entrada de dados pelo sistema: o usuário pode alterar os valores apenas clicando e digitando os valores que mais lhe forem convenientes diretamente nas “caixas” que se encontram respectivamente próximas aos componentes que elas pertencem;
- Entrada de dados pela tabela: ao lado do sistema teste encontram-se duas tabelas que são responsáveis por mostrar os valores digitados pelo usuário ou pré-carregados.
- Entrada de dados de sistemas pré-definidos: o software possui 3 sistemas pré-definidos inclusos em sua biblioteca que podem ser carregados, simulados e alterados se o usuário desejar.

### 3.6.2 Saída de dados do FluxPot.

Para a visualização da saída de dados obtidas através das simulações, o software FluxPot utiliza tabelas e gráficos. Esses dois métodos de exibição podem ser localizados através da figura 17.

Figura 18 - Saída de dados do FluxPot.



Fonte: o autor.

As tabelas das saídas são responsáveis pelos resultados numéricos enquanto que a janela gráfica exibirá valores em forma de gráfico tipo barra que possibilita uma fácil visualização.

## 4 COMPROVAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE

Para comprovar o funcionamento do software FluxPot, foram utilizados alguns exemplos da literatura e principalmente o auxílio de um programa para cálculo do fluxo de potência chamado Matpower foi utilizado. O Matpower é uma ferramenta para o cálculo do fluxo de potência também de licença livre e bom rigor matemático, porém ele tem a desvantagem de não possuir interface gráfica. Este programa foi escolhido para a comprovação do software FluxPot devido ao fato do Matpower possuir alguns exemplos importantes de sistemas em sua biblioteca.

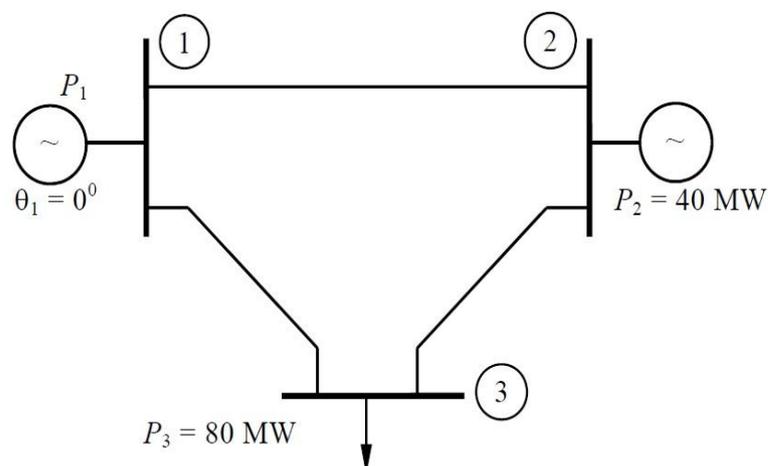
As simulações foram feitas em sistemas de duas barras, três barras, quatro barras, nove barras (IEEE) e quatorze barras (IEEE). Os circuitos escolhidos não possuem transformadores com TAP e transformadores defasadores como o intuito de facilitar o entendimento do funcionamento do *software*.

### 4.1 Simulação do sistema de 3 barras

O primeiro sistema simulado, conforme ilustrado na figura 19, é um sistema elétrico que possui 3 barras e este exemplo foi retirado da bibliografia de Borges (2010).

Os dados estão em pu em uma base de 100 MVa para o sistema. O exemplo foi resolvido utilizando primeiramente o Método Linearizado sem a adição das perdas e em um segundo momento foram acrescentadas a adição das perdas. O ângulo de referência utilizado para este sistema foi ângulo da barra 1 ( $\theta_1$ ).

Figura 19 - Sistema de 3 barras.



Fonte: Borges (2005).

As Tabelas 1 e 2 fornecem respectivamente os dados referentes à matriz linha e a matriz barra extraídos da bibliografia mencionada.

Tabela 1 - Dados das linhas do sistema de 3 barras

Da barra (k)	Para barra (m)	Resistência (R)	Reatância (X)	TAP	FI
1	2	0.050	0.100	-	0
1	3	0.040	0.080	-	0
2	3	0.025	0.050	-	0

Fonte: Borges (2010).

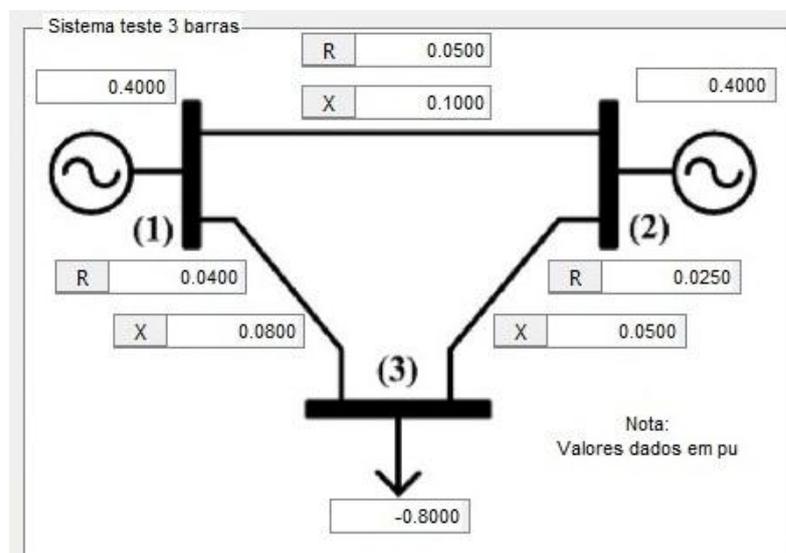
Tabela 2 - Dados das barras do sistema de 3 barras

Barra	Geração	Carga
1	0.400	-
2	0.400	-
3	-	0.800

Fonte: Borges (2010).

Fazendo parte do propósito deste trabalho, o sistema 3 barras da figura 20 também está presente na biblioteca do software FluxPot para que simulações para fim didáticos sejam realizadas.

Figura 20 - Sistema 3 barras para simulação didática



Fonte: o autor

#### 4.1.1 Resultado da simulação do sistema de 3 barras.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados dos fluxos de potência sem perdas e com perdas obtidas pelos cálculos efetuados por Borges (2005).

Tabela 3 - Fluxos de potência do sistema de 3 barras obtidos na literatura

<b>Valores</b>	<b>Fluxo sem perda</b>	<b>Fluxo com perda</b>
$P_{12}$	0.0520	0.0547
$P_{13}$	0.3480	0.3512
$P_{23}$	0.4520	0.4526
$\theta_1$	0.0000	0.0000
$\theta_2$	-0.0052	-0.0054
$\theta_3$	-0.0278	-0.0281

Fonte: o autor.

Com posse dos valores das tabelas 1 e 2 descrita anteriormente, a simulação no software FluxPot foi realizada e os resultados encontrados são demonstrados na tabela 4 para fluxos sem perdas e com perdas respectivamente.

Tabela 4 - Fluxos de potência do sistema de 3 barras obtidos no FluxPot

<b>Valores</b>	<b>Fluxo sem perda</b>	<b>Fluxo com perda</b>
$P_{12}$	0.0522	0.0548
$P_{13}$	0.3478	0.3514
$P_{23}$	0.4522	0.4527
$\theta_1$	0.0000	0.0000
$\theta_2$	-0.0052	-0.0055
$\theta_3$	-0.0278	-0.0281

Fonte: o autor.

Os resultados dos cálculos apresentados em Borges (2005) e o valores obtidos pelo software FluxPot são demonstrados nas tabelas 5 e 6 para eventual comparação.

Tabela 5 - Comparação dos fluxos sem perdas para o sistema de 3 barras

Valores sem perdas	Borges (2005)	FluxPot
$P_{12}$	0.0520	0.0522
$P_{13}$	0.3480	0.3478
$P_{23}$	0.4520	0.4522
$\theta_1$	0.0000	0.0000
$\theta_2$	-0.0052	-0.0052
$\theta_3$	-0.0278	-0.0278

Fonte: o autor.

Tabela 6 - Comparação dos fluxos com perdas para o sistema de 3 barras

Valores com perdas	Borges (2005)	FluxPot
$P_{12}$	0.0547	0.0548
$P_{13}$	0.3512	0.3514
$P_{23}$	0.4526	0.4527
$\theta_1$	0.0000	0.0000
$\theta_2$	-0.0054	-0.0055
$\theta_3$	-0.0281	-0.0281

Fonte: o autor.

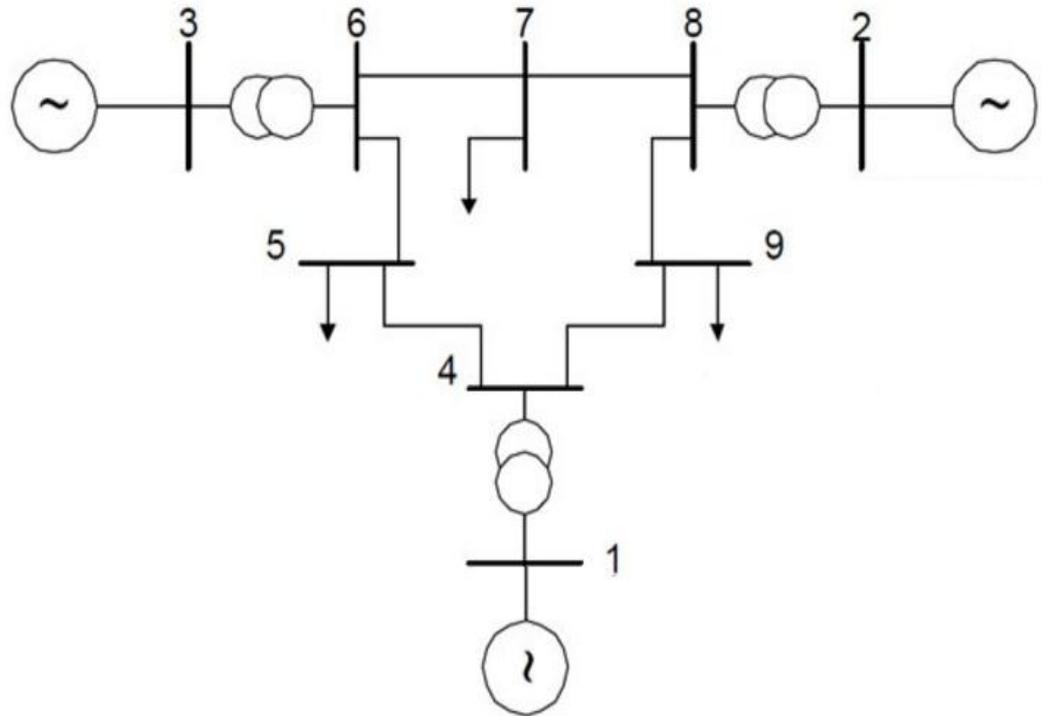
Analisando os resultados obtidos pelo software FluxPot e os resultados apresentados por Borges (2005), considerou-se que o desempenho do software FluxPot para o sistema de 3 barras foi considerado como satisfatório, pois a diferença entre valores foram bem menores que 1%.

## 4.2 Simulação do sistema de 9 barras

O segundo sistema simulado, conforme ilustrado na figura 21, é um sistema elétrico de nove barras retirado da bibliografia de Bueno (2012) e este consta também na biblioteca do Matpower.

Os dados estão em pu em uma base de 100 MVa para o sistema. O exemplo foi resolvido utilizando-se o Método Linearizado sem a adição das perdas. O ângulo de referência escolhido para este sistema foi ângulo da barra 1 ( $\theta_1$ ).

Figura 21 - Sistema de 9 barras



Fonte: Bueno (2012).

As Tabelas 7 e 8 fornecem respectivamente os dados referentes à matriz barras e a matriz linha para o sistema da figura 21.

Tabela 7 - Dados das linhas do sistema de 9 barras

<b>Da barra(k)</b>	<b>Para barra(m)</b>	<b>Resistência (R)</b>	<b>Reatância (X)</b>	<b>TAP</b>	<b>FI</b>
1	4	0	0.0576	1	0
4	5	0.017	0.092	-	0
5	6	0.039	0.17	-	0
3	6	0	0.0586	1	0
6	7	0.0119	0.1008	-	0
7	8	0.0085	0.072	-	0
8	2	0	0.0625	1	0
8	9	0.032	0.161	-	0
9	4	0.01	0.085	-	0

Fonte: Matpower (2016).

Tabela 8 - Dados das barras do sistema de 9 barras

<b>Barra</b>	<b>Geração</b>	<b>Carga</b>
1	0.67	-
2	1.63	-
3	0.85	-
4	-	-
5	-	0.9
6	-	-
7	-	1
8	-	-
9	-	1.25

Fonte: Matpower (2016).

Os valores apresentados nas tabelas 7 e 8 são suficientes para a simulação no software FluxPot e para o programa Matpower.

#### 4.2.1 Resultado da simulação do sistema de 9 barras.

Os resultados das simulações apresentadas pelo programa Matpower e o pelo software FluxPot são demonstrados na tabela 9.

Tabela 9 - Comparação dos fluxos sem perdas para o sistema de 9 barras

<b>Valores sem perdas</b>	<b>Matpower</b>	<b>FluxPot</b>
<b>P<sub>14</sub></b>	0.6700	0.6700
<b>P<sub>45</sub></b>	0.2897	0.2897
<b>P<sub>56</sub></b>	-0.6103	-0.6103
<b>P<sub>36</sub></b>	0.8500	0.8500
<b>P<sub>67</sub></b>	0.2397	0.2397
<b>P<sub>78</sub></b>	-0.7603	-0.7603
<b>P<sub>82</sub></b>	-1.6300	-1.6300
<b>P<sub>89</sub></b>	0.8697	0.8697
<b>P<sub>94</sub></b>	-0.3803	-0.3803

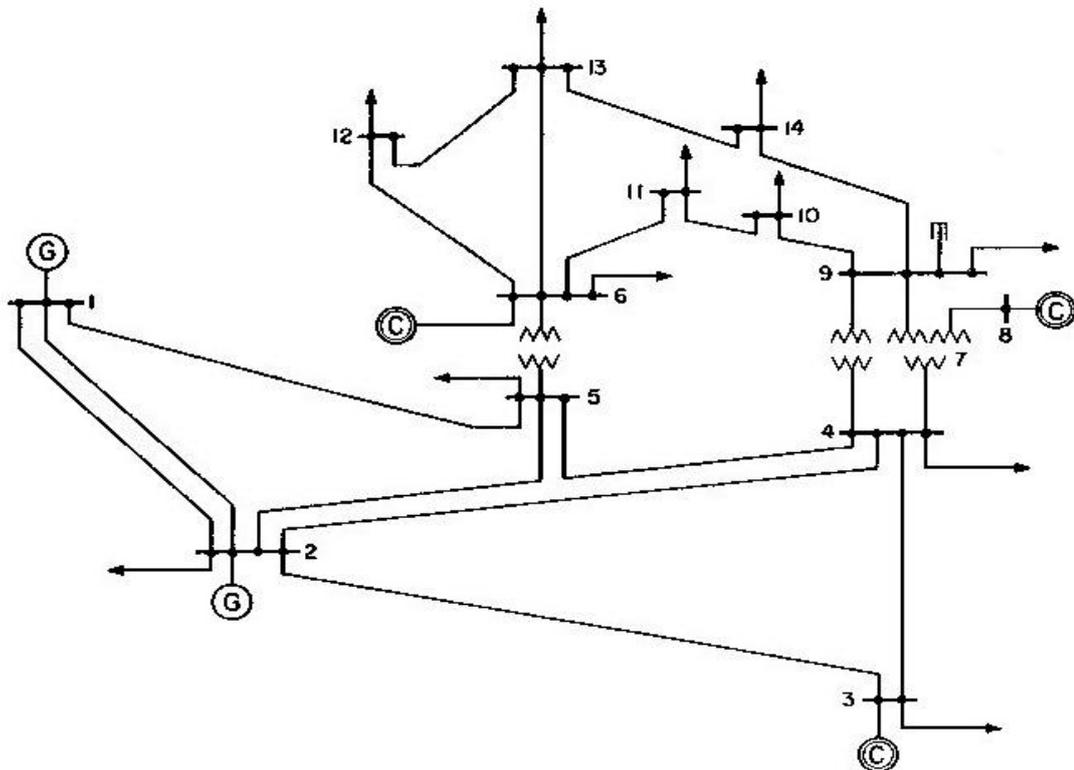
Fonte: o autor.

Analisando os resultados obtidos pelo software FluxPot e pelo programa Matpower, considerou-se o desempenho do software FluxPot para o sistema de 9 barras como satisfatório, uma vez que não houve diferença entre os valores encontrados nos programas em questão.

### 4.3 Simulação do sistema de 14 barras

O sistema de 14 barras utilizado nesta terceira simulação é amplamente utilizado pela comunidade acadêmica para validação e teste de programas. Esse sistema ilustrado na figura 22 faz parte do conjunto de sistemas de testes do IEEE e este consta também na biblioteca do Matpower.

Figura 22 - Sistema elétrico de 14barras do IEEE.



Fonte: IEEE (2016).

Os dados estão em pu em uma base de 100 MVa para o sistema. O exemplo foi resolvido utilizando-se o Método Linearizado sem a adição das perdas. O ângulo de referência escolhido para este sistema foi ângulo da barra 1 ( $\theta_1$ ).

Tabela 10 - Dados das linhas do sistema de 14 barras

Da barra (k)	Para barra (m)	Resistência (R)	Reatância (X)	TAP	FI
1	2	0.01938	0.05917	-	0
1	5	0.05403	0.22304	-	0
2	3	0.04699	0.19797	-	0
2	4	0.05811	0.17632	-	0
2	5	0.05695	0.17388	-	0
3	4	0.06701	0.17103	-	0
4	5	0.01335	0.04211	-	0
4	7	0.00000	0.20912	1	0
4	9	0.00000	0.55618	1	0
5	6	0.00000	0.25202	1	0
6	11	0.09498	0.19890	-	0
6	12	0.12291	0.25581	-	0
6	13	0.06615	0.13027	-	0
7	8	0.00000	0.17615	-	0
7	9	0.00000	0.11001	-	0
9	10	0.03181	0.08450	-	0
9	14	0.12711	0.27038	-	0
10	11	0.08205	0.19207	-	0
12	13	0.22092	0.19988	-	0
13	14	0.17093	0.34802	-	0

Fonte: IEEE (2016).

Tabela 11 - Dados das barras do sistema de 14 barras

<b>Barra</b>	<b>Tipo de barra</b>	<b>Geração</b>	<b>Carga</b>
1	3	2.19	-
2	2	0.183	-
3	2	-	0.942
4	1	-	0.478
5	1	-	0.076
6	2	-	0.112
7	1	-	-
8	2	-	-
9	1	-	0.295
10	1	-	0.09
11	1	-	0.035
12	1	-	0.061
13	1	-	0.135
14	1	-	0.149

Fonte:IEEE (2016).

Os valores apresentados nas tabelas 10 e 11 são suficientes para a simulação no software FluxPot e no programa Matpower.

#### 4.3.1 Resultado da simulação do sistema de 9 barras.

Os resultados das simulações apresentadas pelo programa Matpower e o pelo software FluxPot são demonstrados na tabela 12.

Tabela 12 - Comparação dos resultados do sistema de 14 barras

<b>Valores sem perdas</b>	<b>Matpower</b>	<b>FluxPot</b>
<b>P<sub>12</sub></b>	1.4784	1.4788
<b>P<sub>15</sub></b>	0.7116	0.7112
<b>P<sub>23</sub></b>	0.7001	0.7005
<b>P<sub>24</sub></b>	0.5515	0.5523
<b>P<sub>25</sub></b>	0.4097	0.4090
<b>P<sub>34</sub></b>	-0.2419	-0.2415
<b>P<sub>45</sub></b>	-0.6175	-0.6234
<b>P<sub>47</sub></b>	0.2836	0.2899
<b>P<sub>49</sub></b>	0.1655	0.1663
<b>P<sub>56</sub></b>	0.4279	0.4208
<b>P<sub>6.11</sub></b>	0.0673	0.0630
<b>P<sub>6.12</sub></b>	0.0761	0.0755
<b>P<sub>6.13</sub></b>	0.1725	0.1703
<b>P<sub>78</sub></b>	0.0000	0.0000
<b>P<sub>79</sub></b>	0.2836	0.2899
<b>P<sub>9.10</sub></b>	0.0577	0.0620
<b>P<sub>9.14</sub></b>	0.0964	0.0992
<b>P<sub>10.11</sub></b>	-0.0323	-0.0280
<b>P<sub>12.13</sub></b>	0.0151	0.0145
<b>P<sub>13.14</sub></b>	0.0526	0.0498

Fonte: o autor.

Analisando os resultados obtidos pelo software FluxPot e pelo programa Matpower, considerou-se o desempenho do software FluxPot para o sistema de 14 barras como satisfatório, uma vez que as diferenças entre os valores encontrados nos programas em questão foram pequenas.

## 5 CONCLUSÃO

O FluxPot é um programa computacional capaz de calcular o fluxo de potência de um sistema elétrico utilizando o método numérico linearizado e linearizado com perdas que ficou validado através de comparações entre os resultados obtidos por exemplos de fluxos de potência calculados em algumas literaturas e comparações feitas no programa Matpower. Com isso, os objetivos principais e específicos deste trabalho foram atingidos com sucesso.

Esse programa dispõe de uma utilização intuitiva e de um bom rigor matemático, entregando ao final do cálculo uma tabela ou um gráfico com os valores requisitados.

Para o desenvolvimento do FluxPot, primeiramente foi necessário o estudo da teoria relacionada ao cálculo do fluxo de potência, eletricidade, métodos numéricos.

Em uma segunda fase do desenvolvimento do FluxPot, foi necessário escolher uma linguagem de programação e as ferramentas de desenvolvimento. Optou-se pela linguagem de programação Matlab e pelas suas ferramentas de desenvolvimento Guide e *Compiler*. A grande vantagem dessa escolha está relacionada à facilidade de acesso a esses *softwares*, pois estes estão presentes na maioria dos cursos de graduação de engenharia elétrica.

O desenvolvimento do programa FluxPot foi marcado pelas dificuldades na utilização das ferramentas de desenvolvimento e de como estruturar o software, com isso foi necessária algumas vezes a interrupção do desenvolvimento do programa para o estudo da linguagem de programação Matlab e de suas ferramentas. Além disso, as dúvidas em implementar os conhecimentos em sistemas de potência, métodos numéricos, matemática matricial e demais campos do conhecimento empregados neste trabalho, proporcionaram um tempo de trabalho maior no desenvolvimento do programa, pois foi necessária a implementação e teste de cada pequena parte do programa.

Dessa forma, conclui-se que *softwares* de engenharia não podem ser desenvolvidos por profissionais de tecnologia da informação sem a participação de um ou mais engenheiros, no entanto engenheiros com habilidades em desenvolvimento de softwares possuem plenas condições de desenvolvê-los, porém com um maior tempo gasto. Assim, imagina-se que o melhor desempenho será conquistado com profissionais de ambas as áreas.

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, V. J. L. **Desenvolvimento de um software didático para análise do cálculo do fluxo de potência – PF Analyst**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- BORGES C. L. T. **Análise de sistemas de potência**: Apostila da disciplina de sistemas de potência. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- BUENO, A. A. C.; TAVARES L. F.; MAROCHI, M. V. Z. Desenvolvimento de software com interface gráfica para cálculo de fluxo de potência. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2012.
- CANOSSA, J. H. **Um programa interativo para estudos do fluxo de potência**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- IEEE **Institute of Electrical and Electronic Engineers**. Disponível em: <<http://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Acesso em 05 jun. 2016 as 14:00h.
- LEÃO, R. **Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. Universidade Federal do Paraná, 2009.
- MATLAB – The Language of Technical Computing. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab>>. Acesso em 10 jun. 2016 as 15:30h.
- MATPOWER - **Power System Simulation Package**. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower>>. Acesso em 14 out. 2016 as 20:30h.
- MONTICELLI A. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher, 1983.
- MONTICELLI A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2011.
- STEVENSON JR., W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo, SP: Editora McGraw-Hill, 1986.
- ZOCOLOTTI, D.; MAGALHÃES, H. F.; PELLEGGRI, I. C. M.; KRAHN M. **Desenvolvimento de software didático para cálculo de fluxo de potência**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2002.