

IMPLEMENTAÇÃO DE FLUXO DE CARGA UTILIZANDO O MÉTODO DE
INJEÇÃO DE CORRENTES TRIFÁSICO

Manuel de Araújo Pedro Neto

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Sandoval Carneiro Jr, Ph.D.

(Orientador)

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ

DEZEMBRO DE 2007

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai Antônio e à minha mãe Lucy, pelo amor e dedicação que sempre recebi deles em toda minha vida.

À toda minha família, que esteve torcendo por mim durante esses anos de estudos.

Ao professor Sandoval pelos ensinamentos e orientação do projeto.

Aos meus amigos que sempre estiveram do meu lado.

IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE INJEÇÃO DE CORRENTES TRIFÁSICO EM CÓDIGO MATLAB

A inserção de novas unidades geradoras e cargas no sistema aumentam continuamente provocando mudanças no sistema elétrico de potência. A exigência da qualidade e continuidade de transmissão de energia também aumenta da parte dos consumidores. Tornam-se necessários, então, estudos e planejamento para operação e expansão do sistema elétrico.

O Método Varredura é rápido para simulações de sistemas radiais e sob carga leve ou média. O Método de Injeção de Correntes Trifásico (MICT) é mais robusto e mais rápido que o Método Varredura para sistemas de alto carregamento e com dispositivos de controle.

O presente trabalho mostra a implementação do MICT em código Matlab e faz uma comparação com o Método Varredura. O programa desenvolvido apresenta, basicamente, todas as respostas de um estudo de fluxo de potência.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	4
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
CAPÍTULO 2 – MODELO MATEMÁTICO.....	7
2.1 CARGA TRIFÁSICA	7
2.2 MODELO DE LINHAS	9
2.3 MODELO DE CAPACITORES DERIVAÇÃO	10
2.4 GERAÇÃO	11
2.5 TRANSFORMADORES.....	12
2.6 TRANSFORMADOR REGULADOR DE TENSÃO.....	16
CAPÍTULO 3 – DEFINIÇÃO DOS MÉTODOS	19
3.1 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	19
3.2 FLUXO DE POTÊNCIA EM COORDENADAS POLARES	21
3.3 MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO	22
3.4 MICT - DEFINIÇÕES.....	23
3.5 MODELO DE BARRAS PV	29
3.6 ALGORITMO DO MÉTODO	31
3.7 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	32
CAPÍTULO 4 – PROGRAMA DESENVOLVIDO.....	35
4.1 APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA	35
4.2 OPÇÃO AJUDA	35
4.3 TELA DE RESULTADOS.....	36
4.4 OBSERVAÇÕES.....	38
4.5 ENTRADA DE DADOS NO EXCEL.....	39
CAPÍTULO 5 – SIMULAÇÕES	43
5.1 CASO 3 BARRAS.....	43

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO VARREDURA E MICT.....	44
5.3 CASO 3 BARRAS COM ELEMENTOS DERIVAÇÃO.....	47
5.4 CASO 4 BARRAS COM 1 BARRA PV	49
5.5 RESULTADO DO CASO 4 BARRAS	50
5.6 CASO 4 BARRAS RADIAL	51
5.7 RESULTADO DO CASO 4 BARRAS RADIAL	52
5.8 CONCLUSÕES.....	54
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	55
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO 1 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES.....	58
CASO 3 BARRAS COM FATOR DE CARREGAMENTO $f_c = 2,5$	58
CASO 4 BARRAS.....	60
CASO 4 BARRAS COM BARRA PV	62
CASO 5 BARRAS COM TCAT	64
CASO 13 BARRAS.....	66

Capítulo 1 – Introdução

Hoje em dia torna-se inviável pensar em promover o desenvolvimento de um país sem a utilização de energia. Desde os tempos em que a habilidade humana foi substituída pelas máquinas, na Revolução Industrial, a energia passou a ter um papel fundamental na sociedade.

A energia não auxilia somente nos processos industriais, mas também promove a qualidade de vida das pessoas. Nesse contexto, a eletricidade veio alterar completamente o estilo de vida da sociedade e também auxiliar no seu desenvolvimento.

Pesquisas mostram que há uma relação direta entre desenvolvimento humano e o acesso à eletricidade. A Figura 1.1 mostra essa relação para as regiões do Brasil, [6, 17-19]. Regiões onde o consumo de eletricidade por habitante é pequeno, o índice de desenvolvimento humano (IDH) também é pequeno.

Para atingir a meta de crescimento econômico anual no país, torna-se necessário criar um correto modelo de expansão do setor elétrico brasileiro.

Atualmente a produção de eletricidade no Brasil é majoritariamente oriunda de usinas hidroelétricas. A Figura 1.2 mostra a distribuição das principais fontes para produção de eletricidade, [18] e [19]. Como as usinas hidroelétricas são construídas, geralmente, longe dos grandes centros de consumo, torna-se necessário investir, também, na expansão de transmissão e distribuição de energia.

Um problema constante em sistemas de potência, as linhas de transmissão encontram-se cada vez mais sobrecarregadas. Um dos principais motivos está no aumento desproporcional do consumo de energia. A demanda de energia aumenta continuamente com o tempo, como mostra a Figura 1.3, [18] e [19], salvo em épocas de crise, como ocorreu no Brasil no período de 1999 a 2002. A crise energética, denominada “apagão”, levou o brasileiro a utilizar a energia de forma mais racional, provocando uma inflexão na curva do consumo de energia.

Uma das soluções para evitar o "congestionamento" das linhas de transmissão está na otimização de linhas já existentes ou construção de Linhas de Potência Natural Elevada (LPNEs). Essa medida aumenta a capacidade de transmissão de energia entre os centros de

geração e consumo. Algumas linhas no Brasil já utilizam essa medida para melhorar sua eficiência.

Para evitar o congestionamento de linhas de transmissão e atender à crescente demanda de energia, uma solução interessante é a construção de pequenas unidades geradoras nas proximidades dos centros consumidores.

O Brasil, que possui grande potencial hidroelétrico, deve aproveitar esse fato para a construção de novas PCHs (Pequenas Centrais Hidroelétricas), através do apoio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). A Figura 1.4 mostra a matriz de energia brasileira comparada com a mundial, [17-19].

Embora as PCHs provoquem impactos ambientais nos locais onde são construídas, não poluem o meio ambiente com o passar do tempo.

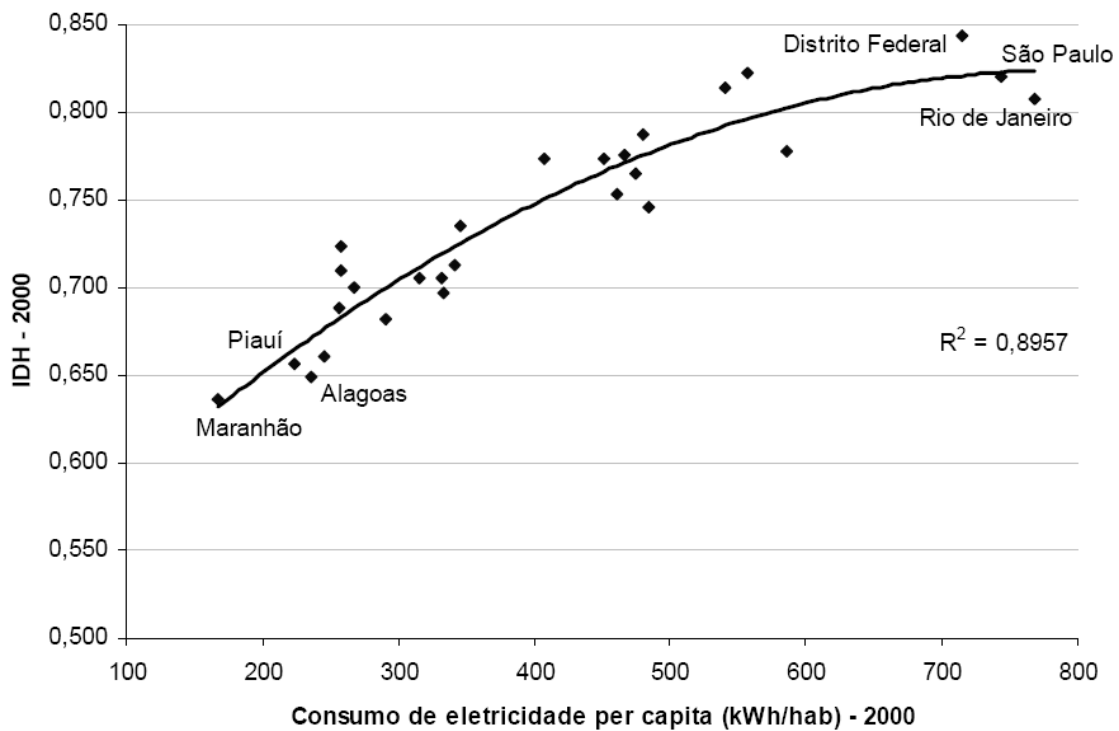


Figura 1.1 – Relação IDH e consumo de eletricidade por habitante por estado em 2000
[19, PNUD 2001]

**MATRIZ DE OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA
2006 (% e TWh)**

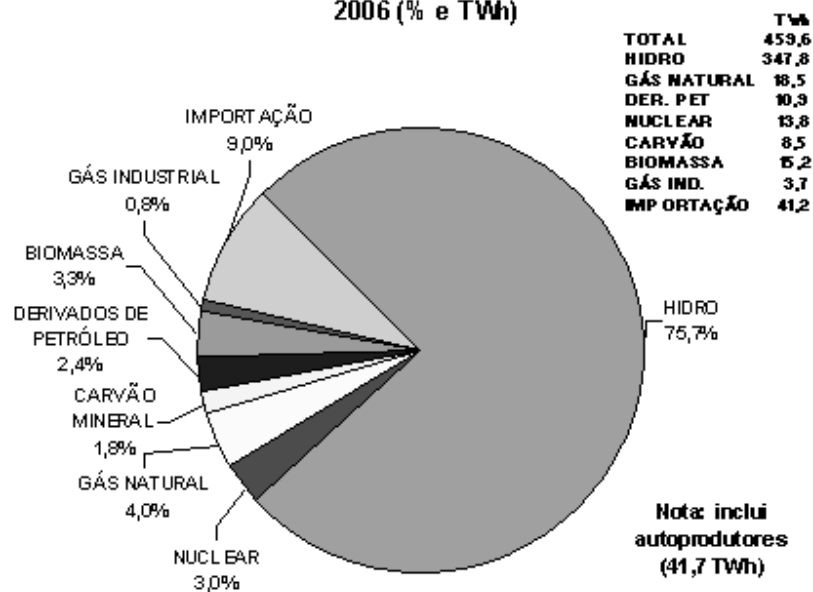


Figura 1.2 – Matriz de fontes de produção de eletricidade no Brasil, [18]

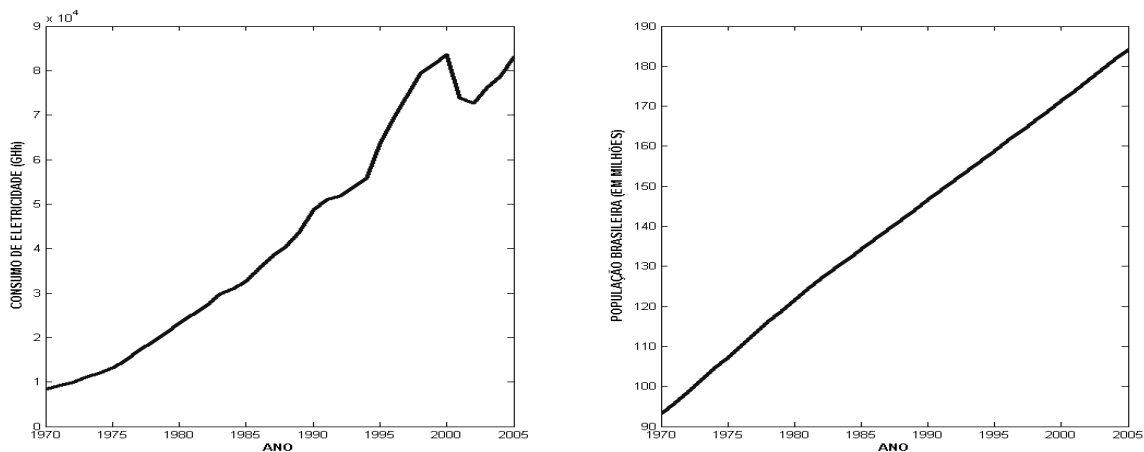


Figura 1.3 – Consumo de eletricidade no Brasil desde 1970 e crescimento da população [18,19]

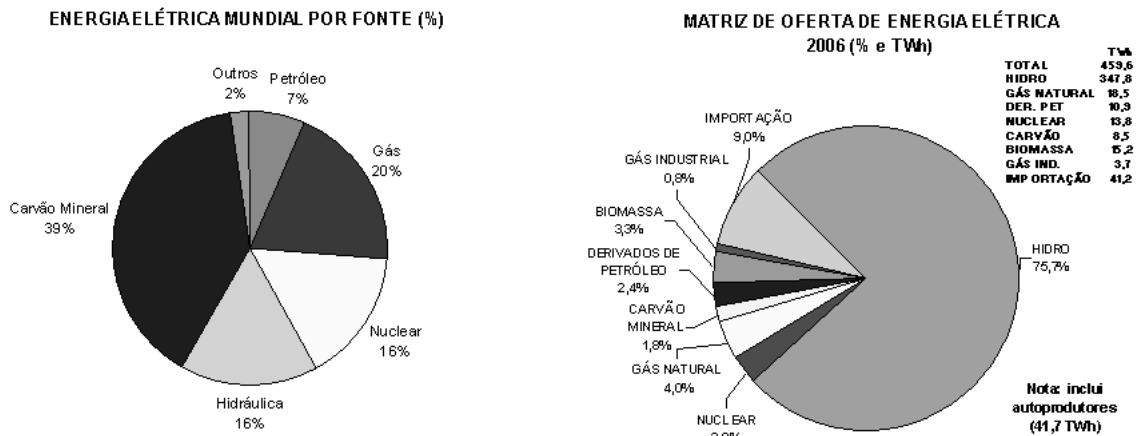


Figura 1.4 – Comparação das fontes de energia elétrica no mundo e no Brasil [18]

1.1 Motivação

Considerando-se a perspectiva de crescimento econômico e a necessidade de se universalizar o acesso à energia elétrica, são necessários investimentos em geração, transmissão, distribuição, em programas de conservação de energia elétrica e em pesquisa. É imprescindível o desenvolvimento de ferramentas computacionais de análise eficazes, robustas, que prevejam a atuação de dispositivos de controle, que forneçam indicativos sobre a margem de carregamento dos sistemas e que orientem os investimentos dos recursos econômicos. A ferramenta básica de análise em sistemas elétricos de potência em regime permanente é o cálculo do fluxo de potência.

O cálculo do fluxo de potência é amplamente utilizado nas áreas de planejamento e operação. O problema consiste, basicamente, no cálculo das tensões nas barras e dos fluxos de potência em um sistema de transmissão, dado um nível de carga especificado e um programa de geração estabelecido.

Os resultados e análises do estudo de fluxo de potência são aplicados no planejamento da expansão, na operação dos sistemas, na otimização dos sistemas elétricos e auxiliam na análise de estabilidade, nos estudos de contingências e análise de sistemas em tempo real.

Vários são os métodos que visam calcular o fluxo de potência em sistemas de energia elétrica. Entre os mais usados, podemos citar Newton-Raphson e Backward-Forward Sweep ou “Varredura”.

O Método Newton-Raphson em coordenadas polares [13] apresenta uma rápida convergência que independe da dimensão do sistema. Essa característica faz desse método um dos mais utilizados. É grande a eficiência desse método em sistemas de transmissão, porém, em sistemas de distribuição, as simplificações adotadas na modelagem dos sistemas, rede de seqüência positiva, não fornecem resultados realistas, pois os sistemas de distribuição apresentam desequilíbrios que devem ser considerados.

O Método da Varredura baseia-se em varreduras sucessivas no sistema até encontrar a solução. Consiste em separar o sistema em camadas, calcular a injeção de correntes nodais em cada barra (considerando as tensões fixas), calcular o somatório dessas correntes partindo da última camada até a primeira (Backward) e atualizar as tensões partindo da primeira camada até a última (Forward), [5].

Este método apresenta um excelente desempenho computacional em sistemas radiais (fracamente malhados) e com baixo carregamento, além de ser um método de fácil compreensão e requerer uma implementação menos trabalhosa. Entretanto, o número de iterações para a solução do problema cresce rapidamente com o aumento do nível de carregamento do sistema. Sistemas muito malhados ou com muitos controles, por exemplo transformadores especiais, apresentam dificuldades nas simulações. Estes são fatores limitantes do método Varredura.

1.2 Objetivos

Tradicionalmente, a maioria dos métodos de fluxo de potência consideram o sistema equilibrado, podendo, então, ser calculado utilizando um modelo equivalente monofásico, obtido a partir da rede de seqüência positiva do sistema. Além de ser mais simples de implementar, o modelo equivalente monofásico apresenta tempos de simulação computacionais menores.

O método de Newton-Raphson para solução do problema de fluxo de potência é expresso em funções de potência na forma polar. No método clássico, as equações são escritas na forma polar. Já o Método de Injeção de Correntes Trifásico (MICT) proposto por Dommel em 1970 e recentemente apresentado em [5], é formulado via equações de

injeção de corrente na forma retangular. Assim, o presente trabalho visa implementar, em código Matlab, o MICT para simulação de sistemas de potência.

Os componentes levados em consideração na implementação são:

- Geradores;
- Cargas;
- Linhas de distribuição;
- Compensadores;
- Transformadores

1.3 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 mostra o modelo matemático e o esquema elétrico dos principais componentes de um sistema de potência.

No Capítulo 3 descreve-se o método de Newton Raphson e sua aplicação no estudo de Fluxo de Potência assim como seu algoritmo.

Depois, são apresentados o Método de Injeção de Correntes Trifásico e seu algoritmo. Esse método apresenta uma singularidade que é a representação de barras PV (barras de tensão controlada). As equações principais estão em função das correntes injetadas em cada barra. As correntes são todas definidas em coordenadas retangulares assim como potência, tensão e impedância de cada barra.

No final do capítulo 3 tem-se um resumo do método de Newton-Raphson e MICT.

No capítulo 4 é apresentado o programa implementado em código Matlab. São explicados como devem ser tratados os dados de entrada para simulação.

No Capítulo 5 são realizados testes com fins de validar os resultados obtidos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas para continuação da melhoria do programa desenvolvido.

Capítulo 2 – Modelo Matemático

Neste capítulo são mostrados os modelos de cada elemento de um sistema de potência. O modelo adotado é trifásico, pois o sistema em estudo pode conter desequilíbrios. O modelo monofásico não apresenta resultados satisfatórios quando há desequilíbrio no sistema. Os modelos matemáticos e suas respectivas equações que seguem a partir deste capítulo são apresentados em [1] e [2].

2.1 Carga Trifásica

Primeiramente é mostrado o modelo de carga. A Figura 2.1 mostra um exemplo de carga trifásica equilibrada.

Considera-se uma carga equilibrada quando $Z_A = Z_B = Z_C = Z_Y$ para uma carga em conexão Y; $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z_{\Delta}$ para o modelo de carga em triângulo.

Uma carga trifásica desequilibrada pode ter outras configurações como uma única carga entre fases; duas cargas em cada fase e a terceira fase em aberto; três cargas conectadas em cada fase com valores distintos, etc.

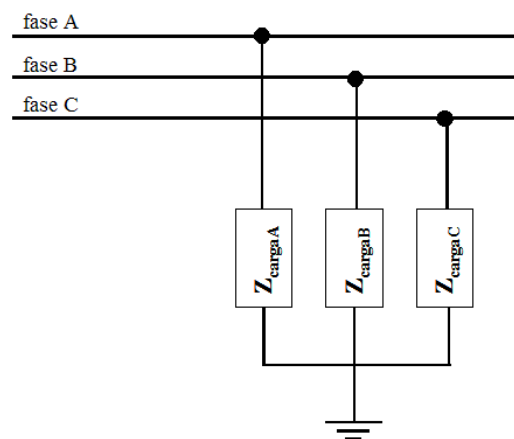


Figura 2.1 – Esquema de Carga Trifásica Equilibrada

Na formulação proposta o modelo de carga é composto de três partes: Potência constante, Impedância constante e Corrente constante de acordo com o modelo ZIP (Z refere-se à impedância; I à corrente e P para potência).

O modelo de Potência constante representa uma carga que não varia com tensão nem corrente. Seu comportamento no sistema depende somente da potência "drenada" pela carga. Este é o modelo mais usado para cargas em simulações de fluxo de potência.

Para o modelo de Corrente constante o comportamento da potência da carga está relacionado diretamente com o comportamento da tensão. Um aumento de tensão provoca um aumento de potência absorvida pela carga ou vice-versa.

Já para o modelo de Impedância constante a potência da carga varia com o quadrado da tensão. Quedas de tensão reduzem a potência drenada na proporção ao quadrado e vice-versa.

A potência aparente de uma carga em cada fase é representada com a soma das potências ativa e reativa, como mostra a Equação 2.1:

$$S^{(i)} = P^{(i)} + jQ^{(i)} \quad (2.1)$$

onde

$$P^{(i)} = P_{esp}^{(i)} \cdot (A_p + B_p \cdot V^{(i)} + C_p \cdot (V^{(i)})^2) = P_0^{(i)} + P_1^{(i)} \cdot V^{(i)} + P_2^{(i)} \cdot (V^{(i)})^2 \quad (2.2)$$

$$Q^{(i)} = Q_{esp}^{(i)} \cdot (A_Q + B_Q \cdot V^{(i)} + C_Q \cdot (V^{(i)})^2) = Q_0^{(i)} + Q_1^{(i)} \cdot V^{(i)} + Q_2^{(i)} \cdot (V^{(i)})^2 \quad (2.3)$$

para

$i = a, b, c$ - são as fases da carga

$P^{(i)}, Q^{(i)}$: Potência ativa e reativa especificadas

A_p, A_Q : Modelo de carga como Potência Constante

B_p, B_Q : Modelo de carga como Corrente Constante

C_p, C_Q : Modelo de carga como Impedância Constante

Uma única carga pode conter os três tipos diferentes de modelo ZIP. Assim, as parcelas são representadas em porcentagem, como mostrado nas equações 2.4 e 2.5:

$$A_p + B_p + C_p = 1 \quad (2.4)$$

$$A_Q + B_Q + C_Q = 1 \quad (2.5)$$

Com relação às barras tem-se as seguintes notações:

barras PQ – Barras consideradas com cargas de potência ativa e reativa constante, expressas pelas Equações 2.2 e 2.3.

barras PV – Barras de potência ativa constante e tensão controlada. No sistema elétrico brasileiro, apresentam uma pequena quantidade quando comparadas com as barras PQ.

barra $V\theta$ - Considerada única no sistema elétrico. É conhecida como “barra de referência” ou "swing" pois tem sua fase considerada zero ($\theta_{V\theta} = 0^\circ$) e todas as outras fases do sistema são referidas à esta.

Esta barra é necessária para servir como referência e para fornecer a informação das perdas de potência, ativa e reativa do sistema, através dos valores de potência líquida conhecidos pelo resultado final da simulação.

2.2 Modelo de Linhas

Normalmente representa-se uma linha pelo seu modelo “ π ”, conforme mostra a Figura 2.2, com impedância série e impedância em derivação nos seus extremos.

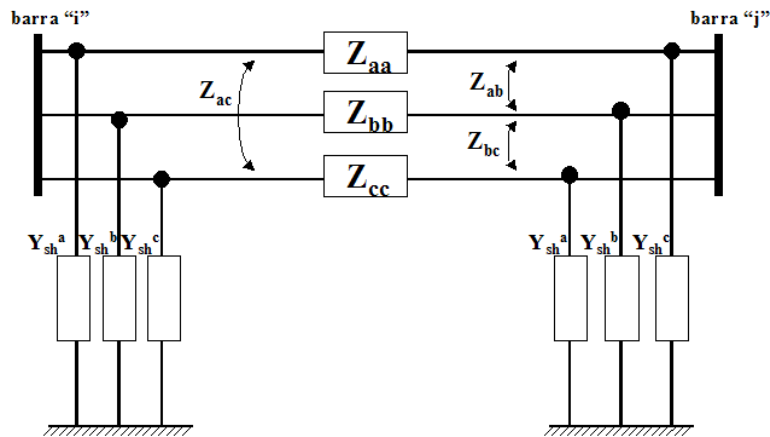


Figura 2.2 – Esquema de linha de transmissão ou distribuição

Na forma matricial, representa-se a impedância série de uma linha da seguinte forma:

$$[Z]^{(a,b,c)} = [r]^{(a,b,c)} + j[x]^{(a,b,c)} \quad (2.6)$$

e cada matriz é representada como segue abaixo.

$$\begin{pmatrix} z_{ij}^{aa} & z_{ij}^{ab} & z_{ij}^{ac} \\ z_{ij}^{ba} & z_{ij}^{bb} & z_{ij}^{bc} \\ z_{ij}^{ca} & z_{ij}^{cb} & z_{ij}^{cc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{ij}^{aa} & r_{ij}^{ab} & r_{ij}^{ac} \\ r_{ij}^{ba} & r_{ij}^{bb} & r_{ij}^{bc} \\ r_{ij}^{ca} & r_{ij}^{cb} & r_{ij}^{cc} \end{pmatrix} + j \begin{pmatrix} x_{ij}^{aa} & x_{ij}^{ab} & x_{ij}^{ac} \\ x_{ij}^{ba} & x_{ij}^{bb} & x_{ij}^{bc} \\ x_{ij}^{ca} & x_{ij}^{cb} & x_{ij}^{cc} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Da mesma forma, representa-se a matriz de elementos derivação em cada extremidade da linha.

$$\left[Y^{sh} \right]^{(abc)} = j \left[b^{sh} \right]^{(abc)} \quad (2.8)$$

$$\left[Y^{sh} \right]^{(abc)} = \begin{pmatrix} y_{ij}^{aa} & y_{ij}^{ab} & y_{ij}^{ac} \\ y_{ij}^{ba} & y_{ij}^{bb} & y_{ij}^{bc} \\ y_{ij}^{ca} & y_{ij}^{cb} & y_{ij}^{cc} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Para uma linha de transmissão curta, considera-se que as admitâncias dos ramos em derivação são praticamente zero, por isso podem ser desprezadas do modelo. Assim consideram-se para linhas de até 80 km de extensão somente a componente série da linha.

Em linhas de transmissão entre 80 e 200 km o modelo é chamado de “ π -nominal”. Os seus elementos são calculados multiplicando-se os parâmetros unidade de comprimento x comprimento da linha, [2].

Linhas de transmissão com comprimentos maiores que 200 km são consideradas longas e os parâmetros de circuito, agora chamado de “ π -equivalente”, deverão ser corrigidos por expressões hiperbólicas, [2].

2.3 Modelo de Capacitores Derivação

Os capacitores são muito utilizados com o objetivo de corrigir, primeiramente, o fator de potência de uma determinada carga. Uma indústria que tenha uma carga com elevada componente indutiva adota a compensação reativa para melhorar o fator de potência e manter sua tensão de alimentação em níveis aceitáveis.

Uma máquina síncrona pode controlar, através do enrolamento de campo, o fluxo de energia reativa, podendo, então, controlar seu fator de potência, [3].

Uma vez corrigido o fator de potência, a corrente drenada pela linha terá uma componente reativa menor. Essa redução de corrente diminui a queda de tensão como também as perdas ao longo da linha.

A compensação é feita nas proximidades da carga local. O modelo adotado de compensação é semelhante aos elementos em derivação do modelo “ π ” de uma linha de transmissão.

A equação 2.10 mostra, na forma matricial, o modelo de uma compensação por banco de capacitores.

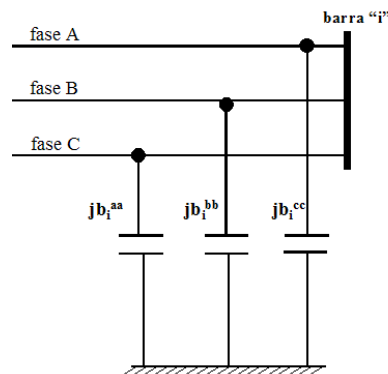


Figura 2.3 – Esquema de banco de capacitores em uma barra

$$[s^{(i)}]^{abc} = j \cdot \begin{bmatrix} b_{aa}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & b_{bb}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & b_{cc}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.4 Geração

Por definição, a potência líquida que uma barra injeta no sistema é a diferença entre potência gerada e potência consumida pela mesma. Assim, para uma barra com gerador e carga tem-se:

$$P_{líq} + jQ_{líq} = (P_G + jQ_G) - (P_L + jQ_L) \quad (2.11)$$

$$P_{líq} + jQ_{líq} = (P_G - P_L) + j(Q_G - Q_L) \quad (2.12)$$

onde

- $P_L \rightarrow$ representa potência ativa consumida
- $P_G \rightarrow$ representa potência ativa gerada
- $Q_L \rightarrow$ representa potência reativa consumida
- $Q_G \rightarrow$ representa potência reativa gerada

Essa conta de potência ativa e reativa é feita para cada fase e em cada barra do sistema.

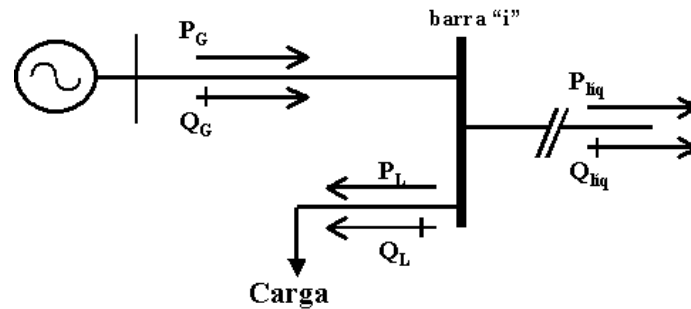


Figura 2.4 – Esquema de Potências Geradas e Consumidas em cada barra

De acordo com a equação 2.12, o valor da potência ativa líquida será maior que zero quando a geração da barra for maior que o consumo; menor que zero quando o consumo for maior que a geração. O mesmo se dá para a potência reativa.

Essa definição de sinais para o fluxo de potência deve ser adotada, também, na interpretação dos resultados da simulação.

2.5 Transformadores

Elementos indispensáveis nos sistemas elétricos que transformam tensões da geração para transmissão e distribuição. Sendo um dos elementos mais comuns, o impacto dos transformadores no sistema elétrico de potência é significativo pois afetam nas perdas, tensões e correntes. A Figura 2.5 mostra um exemplo de conexão dos enrolamentos de um transformador trifásico.

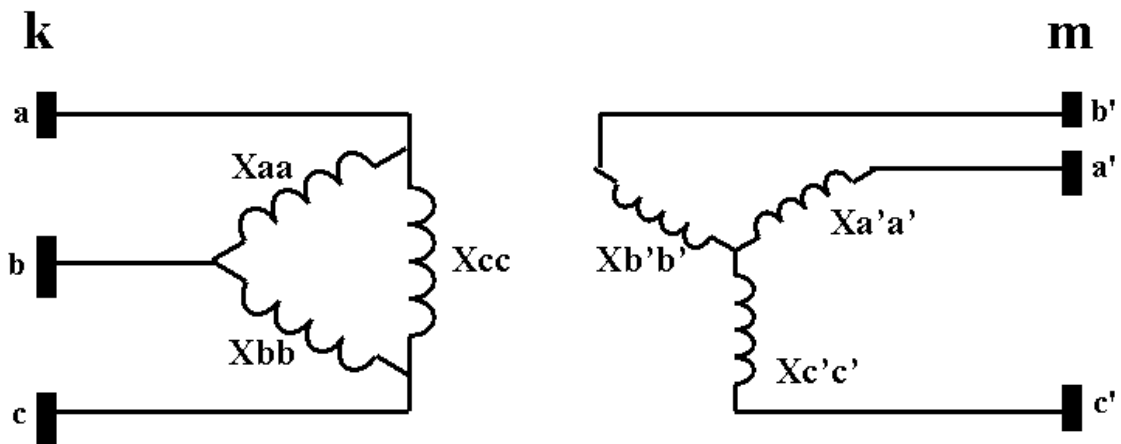


Figura 2.5 – Esquema trifásico de um transformador

O transformador pode ser trifásico ou três bancos monofásicos. Os tipos de ligação podem ser: Y-Y; Y- Δ ; Δ -Y; Δ - Δ . Ainda a configuração estrela (Y) pode ter seu neutro aterrado por uma impedância, Z_n , ou solidamente aterrado, $Z_n = 0$. No caso da Figura 2.5, a configuração é Δ -Y isolado.

Independentemente do tipo de núcleo empregado na construção dos transformadores trifásicos, para um transformador com um enrolamento no primário e um enrolamento no secundário para cada fase, comumente chamado de transformador trifásico de dois enrolamentos, a matriz de impedância primitiva que o representa é dada pela equação (2.13), onde para transformadores construídos em núcleos trifásicos esta matriz apresenta-se cheia, ou seja, com todos os seus elementos diferentes de zero, [1], [7] e [9].

Para um banco de três transformadores monofásicos, não há o acoplamento magnético entre os enrolamentos podendo, então, desconsiderar as impedâncias mútuas. Ficam representadas somente as impedâncias próprias. A Figura 2.6 mostra um banco de três transformadores monofásicos ligados em Y- Δ .

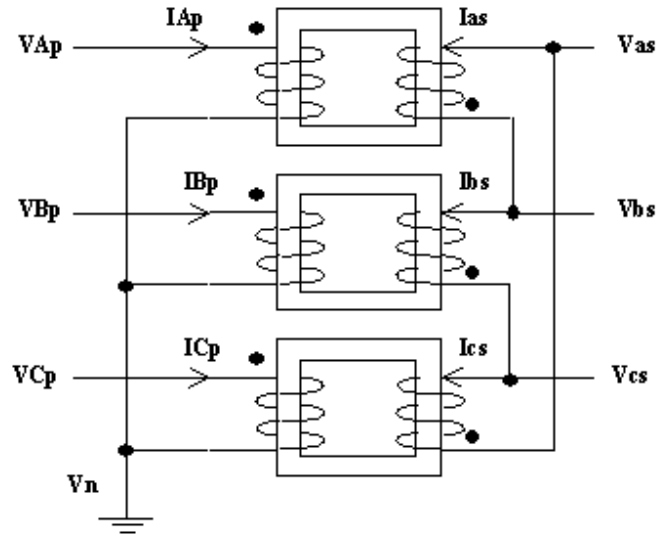


Figura 2.6 – Banco de transformadores monofásicos ligados em Y-Δ

$$Z_{prim} = \begin{bmatrix} Z_{Ap} & Z_{ApBp} & Z_{ApCp} & Z_{ApAs} & Z_{ApBs} & Z_{ApCs} \\ Z_{BpAp} & Z_{Bp} & Z_{BpCp} & Z_{BpAs} & Z_{BpBs} & Z_{BpCs} \\ Z_{ApAs} & Z_{ApBs} & Z_{Cp} & Z_{CpAs} & Z_{CpBs} & Z_{CpCs} \\ \hline Z_{ApAs} & Z_{ApAs} & Z_{AsCp} & Z_{As} & Z_{AsBs} & Z_{AsCs} \\ Z_{BsAp} & Z_{BsBp} & Z_{BsCp} & Z_{BsAs} & Z_{Bs} & Z_{BsCs} \\ Z_{CsAp} & Z_{CsBp} & Z_{CsCp} & Z_{CsAs} & Z_{CsBs} & Z_{Cs} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

A, B, C representam as fases enquanto p e s representam primário e secundário, respectivamente.

A forma compacta da equação 2.13 é representada pela equação 2.14.

$$Z_{prim} = \begin{bmatrix} Z_p^{ABC} & Z_{ps}^{ABC} \\ Z_{sp}^{ABC} & Z_s^{ABC} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

A matriz de impedância primitiva do banco de transformadores monofásicos mostrado na figura 2.7, é então representada pela equação 2.15.

$$Z_{prim} = \begin{bmatrix} Z_{Ap} & 0 & 0 & Z_{ApAs} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{Bp} & 0 & 0 & Z_{BpBs} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{Cp} & 0 & 0 & Z_{CpCs} \\ \hline Z_{ApAs} & 0 & 0 & Z_{As} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{BsBp} & 0 & 0 & Z_{Bs} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{CsCp} & 0 & 0 & Z_{Cs} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Os elementos de impedância são obtidos através de medições. O procedimento das medições é energizar os enrolamentos de cada fase (A, B, C) para cada lado (alta e baixa tensão). Para cada enrolamento energizado, aplica-se um curto-circuito nos demais enrolamentos, um a um, de forma a obter todos os valores de impedância da matriz expressa em 2.13, [12]. A equação 2.16 mostra o cálculo dos valores de impedância primitiva.

$$Z_{xw} = \frac{V_x}{I_w} \quad (2.16)$$

onde V_x é a tensão aplicada no enrolamento x e I_w é a corrente que circula no enrolamento w, curto-circuitado.

Para o cálculo da matriz admitância primitiva, utiliza-se a equação 2.17, [12].

$$Y_{prim} = Z_{prim}^{-1} \quad (2.17)$$

A partir da matriz admitância primitiva, deve-se montar a matriz incidência, que tem seu processo de montagem explicado em [2] e [12]. Basicamente, a matriz incidência nodal é expressa na equação 2.18.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde

$a_{ij} = 1$ se a corrente no ramo ij está saindo do nó j

$a_{ij} = -1$ se a corrente no ramo ij está entrando no nó j

$a_{ij} = 0$ se o nó i não está conectado ao nó j

Para o exemplo de transformador da Figura 2.6, que tem configuração Y- Δ com o lado primário (Y) solidamente aterrado, tem-se matriz de incidência nodal mostrada na equação 2.19.

$$In = \begin{pmatrix} V_{Ap} & V_{Bp} & V_{Cp} & V_{as} & V_{bs} & V_{cs} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} V_{Ap} V_n \\ V_{Bp} V_n \\ V_{Cp} V_n \\ V_{as} V_{bs} \\ V_{bs} V_{cs} \\ V_{cs} V_{as} \end{matrix} \quad (2.19)$$

Para cada tipo de configuração de transformador, tem-se a matriz incidência nodal diferente.

Assim, monta-se a matriz admitância de barra Y_{barra} a partir da equação 2.20, como mostrado em [2], [9] e [12].

$$Y_{barra} = In^t \cdot Y_{prim} \cdot In \quad (2.20)$$

Onde calcula-se Y_{prim} a partir das equações 2.13 e 2.17.

2.6 Transformador Regulador de Tensão

Um problema em suprir cargas distantes dos alimentadores é a manutenção do nível de tensão, que diminui ao longo de uma linha de transmissão. Para isso, utilizam-se transformadores reguladores de tensão.

O regulador de tensão é constituído de um enrolamento em derivação ligado na linha, no qual induz no enrolamento série uma tensão que pode ser subtraída ou adicionada, dependendo da regulação desejada. A Figura 2.7 mostra o esquema elétrico de um regulador de tensão monofásico enquanto que a Figura 2.8 mostra seu diagrama unifilar.

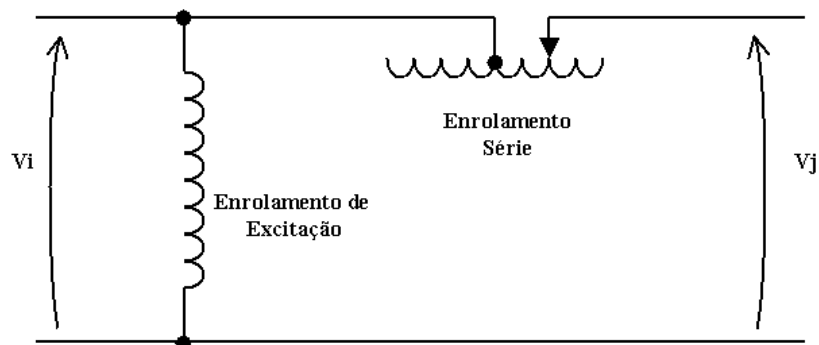


Figura 2.7 – Esquema elétrico de um transformador regulador de tensão monofásico

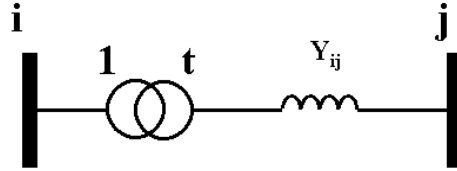


Figura 2.8 – Diagrama unifilar do regulador de tensão

Os reguladores são representados como um banco de três transformadores monofásicos, desconsiderando, então, o acoplamento mútuo entre as fases. As expressões 2.21 a 2.26 mostram o modelo matemático, como mostrado em [1], [9], [12] e [14]. A Figura 2.9 mostra os parâmetros calculados.

$$A = t \cdot Y_{ij} \quad (2.21)$$

$$B = t \cdot (t - 1) \cdot Y_{ij} \quad (2.22)$$

$$C = (1 - t) \cdot Y_{ij} \quad (2.23)$$

$$Y_{ij} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & A \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

$$Y_{sh}^i = \begin{pmatrix} B & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & B \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

$$Y_{sh}^j = \begin{pmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

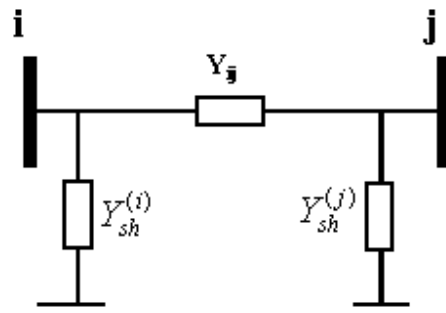


Figura 2.9 – Modelo “ π ” de um regulador de tensão

Capítulo 3 – Definição dos Métodos

Neste capítulo é mostrada a formulação do Método de Injeção de Correntes Trifásico. Todas as equações mostradas foram baseadas na referência [6].

3.1 Método de Newton-Raphson

Esta seção mostra a formulação do método de Newton-Raphson. No estudo de fluxo de potência são variáveis tensão e fase para barras PQ; potência ativa e reativa, para barras Vθ; potência reativa e fase, para barras PV. Assim, seja um conjunto de funções F , cada uma com n variáveis.

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]^t \quad (3.1)$$

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^t \quad (3.2)$$

onde deseja-se que a equação 3.3 seja satisfeita.

$$F(x^{(i)} + \Delta x^{(i)}) = 0 \quad (3.3)$$

Desenvolvendo-se a equação 3.3 pela série de Taylor, tem-se a equação 3.4.

$$F(x^{(i)} + \Delta x^{(i)}) = F(x^{(i)}) + \frac{1}{1!} \left[\frac{dF}{dx} \right]^{(i)} \cdot \Delta x^{(i)} + \frac{1}{2!} \left[\frac{d^2 F}{dx^2} \right]^{(i)} \cdot (\Delta x^{(i)})^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n F}{dx^n} \right]^{(i)} \cdot (\Delta x^{(i)})^n \quad (3.4)$$

Por simplificação, os termos de segunda ordem ou superiores são desprezados da formulação, pois são muito pequenos quando comparados com o primeiro termo da série de Taylor. Assim, usa-se somente o primeiro termo da equação 3.4, como mostrado na equação 3.5.

$$F(x^{(i)} + \Delta x^{(i)}) = F(x^{(i)}) + \left[\frac{dF}{dx} \right]^{(i)} \cdot \Delta x^{(i)} \quad (3.5)$$

O elemento $\left[\frac{dF}{dx} \right]^{(i)}$ é chamado de “Jacobiano” . Assim, reescrevendo-se a equação 3.3

de acordo com a equação 3.5, tem-se a seguinte formulação:

$$F(x^{(i)}) + J^{(i)} \cdot \Delta x^{(i)} = 0 \quad (3.6)$$

A equação 3.6 representa a formulação do Método Newton-Raphson para fluxo de potência usando o primeiro termo da série de Taylor. O fluxograma é representado na Figura 3.1.

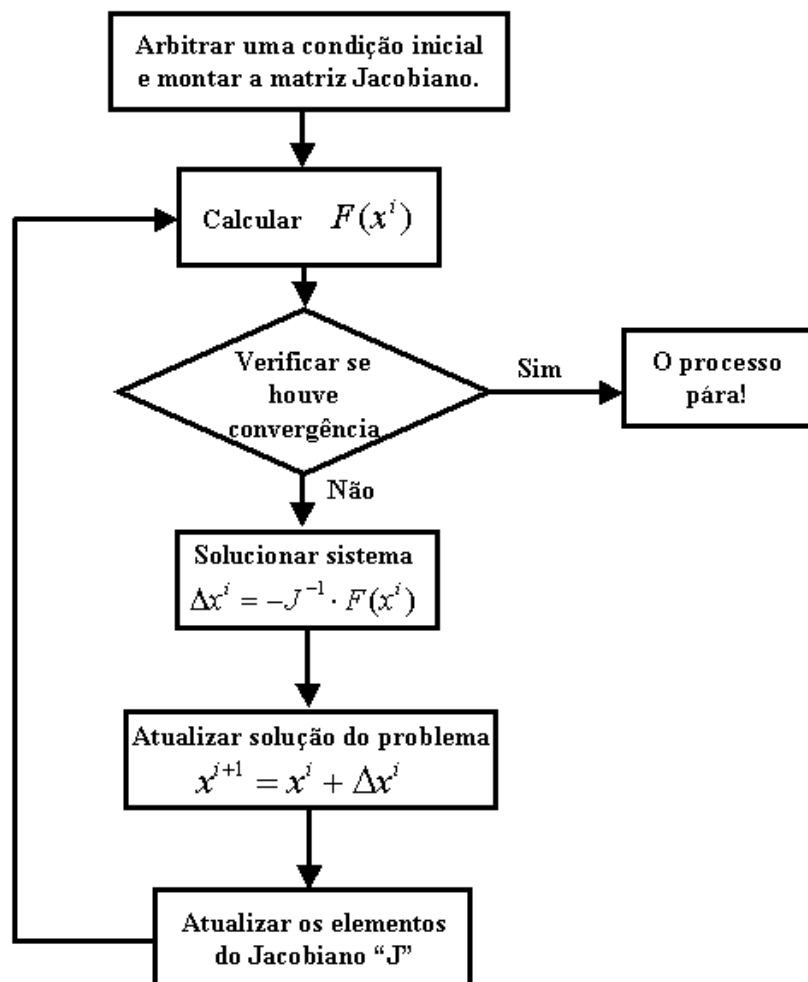


Figura 3.1 – Fluxograma do Método Newton-Raphson

O critério de convergência é estabelecido da seguinte forma: a cada iteração, verificar se a diferença entre o valor da função $F(x)^i$ e o valor especificado $F(x)^{especificado}$ é menor

que um valor de tolerância estabelecido. Se a diferença entre os valores for menor que a tolerância, o processo convergiu; senão, deve-se continuar o processo. Ou seja, $|F(x)^{(i)} - F(x)^{(espe)}| < \varepsilon$ para considerar convergência da solução.

3.2 Fluxo de Potência em Coordenadas Polares

As equações básicas no problema de fluxo de potência são expostas a seguir. Inicialmente supõe-se que um sistema com “n” barras, sendo “1” do tipo PQ; uma barra do tipo V θ e “n – l – 1” barras do tipo PV. As tensões são escritas na forma polar.

Para uma barra “k” qualquer do sistema, tem-se o cálculo da potência ativa e reativa líquida, assim como seus respectivos resíduos.

$$P_k = V_K \cdot \left(\sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + B_{km} \cdot \sin(\theta_{km})) \right), k \in \forall \text{ PQ e PV} \quad (3.7)$$

$$Q_k = V_K \cdot \left(\sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) - B_{km} \cdot \cos(\theta_{km})) \right), k \in \forall \text{ PQ} \quad (3.8)$$

$$\Delta P_k = P_k^{\text{especificado}} - P_k^{\text{calculado}}, k \in \forall \text{ PQ e PV} \quad (3.9)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{especificado}} - Q_k^{\text{calculado}}, k \in \forall \text{ PQ} \quad (3.10)$$

onde $P_k^{\text{especificado}}$ e $Q_k^{\text{especificado}}$ são valores fornecidos pelo usuário.

As equações (3.7) e (3.8) mostram que as potências ativas são calculadas nas barras PQ e PV enquanto que as potências reativas são calculadas somente nas barras PQ, pois nas barras PV e V θ não há controle de potência reativa.

O problema na forma matricial é mostrado como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(i)} = -J^{(i)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)} \quad (3.11)$$

para

$\Delta\theta \rightarrow$ variação do ângulo de fase da tensão para cada barra

$\Delta V \rightarrow$ variação do módulo de tensão para cada barra

Assim a matriz Jacobiano é definida como:

$$J = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

para

$$H_{(n-1),(n-1)} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (3.13)$$

$$N_{(n-1),(l)} = \frac{\partial P}{\partial V} \quad (3.14)$$

$$M_{(l),(n-1)} = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad (3.15)$$

$$L_{(l),(l)} = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (3.16)$$

A atualização das variáveis a cada iteração é mostrada na equação 3.17.

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i)} + \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)} \quad (3.17)$$

O processo pára quando os resíduos de potência, definidos pelas equações (3.9) e (3.10), forem menores que o valor da tolerância, ϵ .

3.3 Método Desacoplado Rápido

Nos sistemas de potência, dado o forte acoplamento entre potência ativa com ângulo de fase de tensão e potência reativa com módulo de tensão, os elementos H e L são relativamente maiores que N e M, pois $N = \frac{dP}{dV} \approx 0$ e $M = \frac{dQ}{d\theta} \approx 0$.

O Método Desacoplado Rápido considera, por simplificação, os elementos M e N como zeros. Assim, a nova matriz Jacobiano pode ser representada como mostra a equação 3.18.

$$J = - \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Essa nova matriz permite separar a solução em dois sub-sistemas, representadas pelas equações 3.19 e 3.20.

$$[\Delta P]^{(i)} = -H^{(i)} \cdot [\Delta \theta]^{(i)} \quad (3.19)$$

$$[\Delta Q]^{(i)} = -L^{(i)} \cdot [\Delta V]^{(i)} \quad (3.20)$$

3.4 MICT - Definições

Esta seção apresenta o Método de Injeção de Correntes Trifásico.

O primeiro passo do método é representar as grandezas (impedância, tensões e correntes) em partes reais e imaginárias. Isto significa que o método opera com as grandezas na forma “retangular”. A equação básica é mostrada em (3.21).

$$[I]^{(abc)} = [Y]^{(abc)} \cdot [V]^{(abc)} \quad (3.21)$$

onde

[I] representa vetor de corrente injetada de cada barra

[Y] representa matriz admitância do sistema

[V] representa vetor tensão de cada barra

O vetor corrente $[I]^{a,b,c}$ da equação (3.21) é representado na forma retangular, para a barra “k” de um sistema com “n” barras.

$$[I]_k^{(abc)} = \begin{bmatrix} I_k^a \\ I_k^b \\ I_k^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{rk}^a \\ I_{rk}^b \\ I_{rk}^c \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} I_{imk}^a \\ I_{imk}^b \\ I_{imk}^c \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

o mesmo para o vetor tensão $[V]^{a,b,c}$:

$$[V]_k^{(abc)} = \begin{bmatrix} V_k^a \\ V_k^b \\ V_k^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{rk}^a \\ V_{rk}^b \\ V_{rk}^c \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} V_{imk}^a \\ V_{imk}^b \\ V_{imk}^c \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Para a matriz admitância, a representação em real e imaginária entre duas barras “k” e “t” é dada como:

$$[Y]_{kt}^{(abc)} = \begin{bmatrix} G_{kt}^{aa} & G_{kt}^{ab} & G_{kt}^{ac} \\ G_{kt}^{ba} & G_{kt}^{bb} & G_{kt}^{bc} \\ G_{kt}^{ca} & G_{kt}^{cb} & G_{kt}^{cc} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} B_{kt}^{aa} & B_{kt}^{ab} & B_{kt}^{ac} \\ B_{kt}^{ba} & B_{kt}^{bb} & B_{kt}^{bc} \\ B_{kt}^{ca} & B_{kt}^{cb} & B_{kt}^{cc} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Desenvolvendo a equação 3.21 através das equações 3.23 e 3.24, tem-se a corrente líquida calculada para a barra k.

$$[I]_k^{(abc)} = [Y]_{kk}^{(abc)} \cdot [V]_k^{(abc)} + \sum_{m \neq k}^n [Y]_{km}^{(abc)} \cdot [V]_m^{(abc)} \quad (3.25)$$

Separando todos os elementos da equação (3.23) em parte real e imaginária como expressam as equações (3.22) a (3.24), tem-se o seguinte resultado para a parte real da corrente:

$$[I]_{rk}^{(abc)} = [G]_{kk}^{(abc)} \cdot [V]_{rk}^{(abc)} - [B]_{kk}^{(abc)} \cdot [V]_{mk}^{(abc)} + \sum_{i \neq k}^n [G]_{ki}^{(abc)} \cdot [V]_{ri}^{(abc)} - [B]_{ki}^{(abc)} \cdot [V]_{mi}^{(abc)} \quad (3.26)$$

e para a parte imaginária tem-se:

$$[I]_{imk}^{(abc)} = [B]_{kk}^{(abc)} \cdot [V]_{rk}^{(abc)} + [G]_{kk}^{(abc)} \cdot [V]_{imk}^{(abc)} + \sum_{i \neq k}^n [B]_{ki}^{(abc)} \cdot [V]_{ri}^{(abc)} + [G]_{ki}^{(abc)} \cdot [V]_{imi}^{(abc)} \quad (3.27)$$

Reorganizando-se as equações desenvolvidas em (3.26) e (3.27) na forma matricial de acordo com a equação (3.25), pode-se ver que:

$$\begin{bmatrix} I_{imk}^{(abc)} \\ I_{rk}^{(abc)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{kk}^{(abc)} & G_{kk}^{(abc)} \\ G_{kk}^{(abc)} & -B_{kk}^{(abc)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{rk}^{(abc)} \\ V_{imk}^{(abc)} \end{bmatrix} + \sum_{w \neq k}^n \begin{bmatrix} B_{ki}^{(abc)} & G_{ki}^{(abc)} \\ G_{ki}^{(abc)} & -B_{ki}^{(abc)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{rw}^{(abc)} \\ V_{imw}^{(abc)} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Assim, a equação (3.21) pode ser reescrita na sua forma retangular:

$$\begin{bmatrix} I_{im1}^{(abc)} \\ I_{r1}^{(abc)} \\ I_{im2}^{(abc)} \\ I_{r2}^{(abc)} \\ \vdots \\ I_{imN}^{(abc)} \\ I_{rN}^{(abc)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11}^{(abc)} & G_{11}^{(abc)} & B_{12}^{(abc)} & G_{12}^{(abc)} & \cdots & B_{1N}^{(abc)} & G_{1N}^{(abc)} \\ G_{11}^{(abc)} & -B_{11}^{(abc)} & G_{12}^{(abc)} & -B_{12}^{(abc)} & \cdots & G_{1N}^{(abc)} & -B_{1N}^{(abc)} \\ \hline B_{21}^{(abc)} & G_{21}^{(abc)} & B_{22}^{(abc)} & G_{22}^{(abc)} & \cdots & B_{2N}^{(abc)} & G_{2N}^{(abc)} \\ G_{21}^{(abc)} & -B_{21}^{(abc)} & G_{22}^{(abc)} & -B_{22}^{(abc)} & \cdots & G_{2N}^{(abc)} & -B_{2N}^{(abc)} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \hline B_{N1}^{(abc)} & G_{N1}^{(abc)} & B_{N2}^{(abc)} & G_{N2}^{(abc)} & \cdots & B_{NN}^{(abc)} & G_{NN}^{(abc)} \\ G_{N1}^{(abc)} & -B_{N1}^{(abc)} & G_{N2}^{(abc)} & -B_{N2}^{(abc)} & \cdots & G_{NN}^{(abc)} & -B_{NN}^{(abc)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{r1}^{(abc)} \\ V_{im1}^{(abc)} \\ V_{r2}^{(abc)} \\ V_{im2}^{(abc)} \\ \vdots \\ V_{rN}^{(abc)} \\ V_{imN}^{(abc)} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Percebe-se que o vetor de tensão é construído na seqüência real e imaginário enquanto que o resultado fornece o vetor corrente na seqüência imaginário, real.

Como mostrado na equação 3.29, o vetor corrente é representado:

$$\begin{bmatrix} I_{ima} \\ I_{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & G \\ G & -B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{re} \\ \Delta V_{ima} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Para sistemas de distribuição pode-se desprezar, por simplificação, o elemento G. Isto porque a componente resistiva é menor que a componente indutiva numa linha de distribuição. A matriz simplificada é expressa em 3.31.

$$\begin{bmatrix} I_{ima} \\ I_{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & -B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{re} \\ \Delta V_{ima} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Com esse tipo de representação, não há problema em trabalhar com a matriz Jacobiano, pois seus elementos na diagonal principal não são zeros.

Caso a matriz Jacobiano fosse construída de acordo com a equação 3.32, que também está correto, a simplificação tornaria a matriz mais difícil de se inverter. Assim, escolhe-se a forma expressa em 3.30, que não apresenta dificuldades nas operações matemáticas.

$$\begin{bmatrix} I_{re} \\ I_{ima} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{re} \\ \Delta V_{ima} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Ainda definindo as grandezas do sistema em função de tensões e correntes reais e imaginárias, pode-se definir as potências, ativa e reativa, como segue:

$$[S]^{(abc)} = [P]^{(abc)} + j[Q]^{(abc)} = [V]_k^{(abc)} \cdot [I]_{mk}^{*(abc)} \quad (3.33)$$

$$[P]_k^{(abc)} + j[Q]_k^{(abc)} = \left[\left(V_{rk}^{(abc)} + jV_{imk}^{(abc)} \right) \cdot \left(I_{rk}^{(abc)} - jI_{imk}^{(abc)} \right) \right] \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} P_k^{(a)} \\ P_k^{(b)} \\ P_k^{(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{rk}^{(a)} \cdot I_{rk}^{(a)} + V_{imk}^{(a)} \cdot I_{imk}^{(a)} \\ V_{rk}^{(b)} \cdot I_{rk}^{(b)} + V_{imk}^{(b)} \cdot I_{imk}^{(b)} \\ V_{rk}^{(c)} \cdot I_{rk}^{(c)} + V_{imk}^{(c)} \cdot I_{imk}^{(c)} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} Q_k^{(a)} \\ Q_k^{(b)} \\ Q_k^{(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{imk}^{(a)} \cdot I_{rk}^{(a)} - V_{rk}^{(a)} \cdot I_{imk}^{(a)} \\ V_{imk}^{(b)} \cdot I_{rk}^{(b)} - V_{rk}^{(b)} \cdot I_{imk}^{(b)} \\ V_{imk}^{(c)} \cdot I_{rk}^{(c)} - V_{rk}^{(c)} \cdot I_{imk}^{(c)} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Para cada iteração,   definida a variação de potência ativa e reativa como a diferenç a entre a potência calculada em cada iteração e a potência especificada inicialmente pelo usuário.

$$\Delta P_k^{h(abc)} = P_{k,calculado}^{h(abc)} - P_{especificado}^{h(abc)} \quad (3.37)$$

$$\Delta Q_k^{h(abc)} = Q_{k,calculado}^{h(abc)} - Q_{especificado}^{h(abc)} \quad (3.38)$$

onde $h \rightarrow$ iteração e k representa a barra.

Assim, a atualização das potências ativa e reativa para a iteração seguinte   definida:

$$P_k^{h+1(abc)} = P_k^{h(abc)} + \Delta P_k^{h(abc)} \quad (3.39)$$

$$Q_k^{h+1(abc)} = Q_k^{h(abc)} + \Delta Q_k^{h(abc)} \quad (3.40)$$

Por definição, calcula-se $P_{especificado}$ e $Q_{especificado}$ como segue:

$$P_{esp}^{k(abc)} = P_G^{k(abc)} - P_L^{k(abc)} = P_G^{k(abc)} - \left(P_0^{k(abc)} + P_1^{k(abc)} \cdot V^{k(abc)} + P_2^{k(abc)} \cdot \left(V^{k(abc)} \right)^2 \right) \quad (3.41)$$

$$Q_{esp}^{k(abc)} = Q_G^{k(abc)} - Q_L^{k(abc)} = Q_G^{k(abc)} - \left(Q_0^{k(abc)} + Q_1^{k(abc)} \cdot V^{k(abc)} + Q_2^{k(abc)} \cdot \left(V^{k(abc)} \right)^2 \right) \quad (3.42)$$

As constantes do modelo de carga (P_0, P_1, P_2) e (Q_0, Q_1, Q_2) são as mesmas definidas nas equa es (2.2) e (2.3) respectivamente.

Definindo-se os r sduos de corrente com os valores das equa es (3.23), (3.37) e (3.38):

$$[\Delta I]_{rk}^{(abc)} = \left[\frac{V_{rk}^{(abc)} \cdot \Delta P_k^{(abc)} + V_{imk}^{(abc)} \cdot \Delta Q_k^{(abc)}}{\left(V_{rk}^{(abc)} \right)^2 + \left(V_{imk}^{(abc)} \right)^2} \right] \quad (3.43)$$

$$[\Delta I]_{imk}^{(abc)} = \left[\frac{V_{imk}^{(abc)} \cdot \Delta P_k^{(abc)} - V_{rk}^{(abc)} \cdot \Delta Q_k^{(abc)}}{(V_{rk}^{(abc)})^2 + (V_{imk}^{(abc)})^2} \right] \quad (3.44)$$

A equação (3.43) mostra o resíduo de corrente real enquanto que (3.44) mostra resíduo de corrente imaginário. Reescrevendo as equações (3.37) e (3.38) em função das equações (3.41) e (3.42) e aplicando-as nas últimas (3.43) e (3.44) tem-se a definição dos resíduos de corrente em função dos parâmetros de carga em cada barra.

$$\Delta I_{rk} = \frac{V_{rk} \cdot (P_G^k - P_0^k - P_1^k \cdot V_k - P_2^k \cdot V_k^2) + V_{mk} \cdot (Q_G^k - Q_0^k - Q_1^k \cdot V_k - Q_2^k \cdot V_k^2)}{(V_{rk})^2 + (V_{mk})^2} \quad (3.45)$$

$$\Delta I_{mk} = \frac{V_{mk} \cdot (P_G^k - P_0^k - P_1^k \cdot V_k - P_2^k \cdot V_k^2) - V_{rk} \cdot (Q_G^k - Q_0^k - Q_1^k \cdot V_k - Q_2^k \cdot V_k^2)}{(V_{rk})^2 + (V_{mk})^2} \quad (3.46)$$

onde cada um desses valores deve ser calculado para cada fase.

O Jacobiano é formado de acordo com a expressão 3.47.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r^a \\ \Delta I_r^b \\ \Delta I_r^c \\ \Delta I_m^a \\ \Delta I_m^b \\ \Delta I_m^c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_r^a}{\partial \Delta V_r^a} & \frac{\partial \Delta I_r^a}{\partial \Delta V_r^b} & \frac{\partial \Delta I_r^a}{\partial \Delta V_r^c} & \frac{\partial \Delta I_r^a}{\partial \Delta V_m^a} & \frac{\partial \Delta I_r^a}{\partial \Delta V_m^b} & \frac{\partial \Delta I_r^a}{\partial \Delta V_m^c} \\ \frac{\partial \Delta I_r^b}{\partial \Delta V_r^a} & \frac{\partial \Delta I_r^b}{\partial \Delta V_r^b} & \frac{\partial \Delta I_r^b}{\partial \Delta V_r^c} & \frac{\partial \Delta I_r^b}{\partial \Delta V_m^a} & \frac{\partial \Delta I_r^b}{\partial \Delta V_m^b} & \frac{\partial \Delta I_r^b}{\partial \Delta V_m^c} \\ \frac{\partial \Delta I_r^c}{\partial \Delta V_r^a} & \frac{\partial \Delta I_r^c}{\partial \Delta V_r^b} & \frac{\partial \Delta I_r^c}{\partial \Delta V_r^c} & \frac{\partial \Delta I_r^c}{\partial \Delta V_m^a} & \frac{\partial \Delta I_r^c}{\partial \Delta V_m^b} & \frac{\partial \Delta I_r^c}{\partial \Delta V_m^c} \\ \frac{\partial \Delta I_m^a}{\partial \Delta V_r^a} & \frac{\partial \Delta I_m^a}{\partial \Delta V_r^b} & \frac{\partial \Delta I_m^a}{\partial \Delta V_r^c} & \frac{\partial \Delta I_m^a}{\partial \Delta V_m^a} & \frac{\partial \Delta I_m^a}{\partial \Delta V_m^b} & \frac{\partial \Delta I_m^a}{\partial \Delta V_m^c} \\ \frac{\partial \Delta I_m^b}{\partial \Delta V_r^a} & \frac{\partial \Delta I_m^b}{\partial \Delta V_r^b} & \frac{\partial \Delta I_m^b}{\partial \Delta V_r^c} & \frac{\partial \Delta I_m^b}{\partial \Delta V_m^a} & \frac{\partial \Delta I_m^b}{\partial \Delta V_m^b} & \frac{\partial \Delta I_m^b}{\partial \Delta V_m^c} \\ \frac{\partial \Delta I_m^c}{\partial \Delta V_r^a} & \frac{\partial \Delta I_m^c}{\partial \Delta V_r^b} & \frac{\partial \Delta I_m^c}{\partial \Delta V_r^c} & \frac{\partial \Delta I_m^c}{\partial \Delta V_m^a} & \frac{\partial \Delta I_m^c}{\partial \Delta V_m^b} & \frac{\partial \Delta I_m^c}{\partial \Delta V_m^c} \end{bmatrix}}_{\text{Jacobiano}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_r^a \\ \Delta V_r^b \\ \Delta V_r^c \\ \Delta V_m^a \\ \Delta V_m^b \\ \Delta V_m^c \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Vê-se que cada elemento é a derivada do resíduo de corrente em relação à tensão. Mais adiante será mostrada uma importante vantagem em trabalhar com essa matriz.

Desenvolvendo-se as derivadas e agrupando-se os elementos em quatro sub-matrizes tem-se:

$$\left[Y_{kk}^{\bullet} \right]^{(abc)} = \begin{bmatrix} B_{kk}^{(abc)} & G_{kk}^{(abc)} \\ G_{kk}^{(abc)} & B_{kk}^{(abc)} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

onde

$$B_{kk}^{(abc)} = \left[B_{kk}^{(abc)} \right] - \begin{bmatrix} \alpha_k^a & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_k^b & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_k^c \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$G_{kk}^{(abc)} = \left[G_{kk}^{(abc)} \right] - \begin{bmatrix} b_k^a & 0 & 0 \\ 0 & b_k^b & 0 \\ 0 & 0 & b_k^c \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$G_{kk}^{n(abc)} = \left[G_{kk}^{(abc)} \right] - \begin{bmatrix} c_k^a & 0 & 0 \\ 0 & c_k^b & 0 \\ 0 & 0 & c_k^c \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$B_{kk}^{n(abc)} = - \left[B_{kk}^{(abc)} \right] - \begin{bmatrix} d_k^a & 0 & 0 \\ 0 & d_k^b & 0 \\ 0 & 0 & d_k^c \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

As matrizes $\left[B_{kk}^{(abc)} \right]$ e $\left[G_{kk}^{(abc)} \right]$ são as mesmas usadas para montar a matriz de admitância retangular vistas na equação (3.24).

As constantes $\alpha_k^{abc}, b_k^{abc}, c_k^{abc}, d_k^{abc}$ são definidas como:

$$\alpha_k^i = \frac{Q_{0k}^i \cdot \left((V_{rk}^i)^2 - (V_{mk}^i)^2 \right) - 2 \cdot V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot P_{0k}^i}{(V_k^i)^4} + \frac{V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot P_{1k}^i + Q_{1k}^i \cdot (V_{mk}^i)^2}{(V_k^i)^3} + Q_{2k}^i \quad (3.53)$$

$$b_k^i = \frac{P_{0k}^i \cdot \left((V_{rk}^i)^2 - (V_{mk}^i)^2 \right) + 2 \cdot V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot Q_{0k}^i}{(V_k^i)^4} - \frac{V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot Q_{1k}^i + P_{1k}^i \cdot (V_{mk}^i)^2}{(V_k^i)^3} - P_{2k}^i \quad (3.54)$$

$$c_k^i = \frac{P_{0k}^i \cdot \left((V_{mk}^i)^2 - (V_{rk}^i)^2 \right) - 2 \cdot V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot Q_{0k}^i}{(V_k^i)^4} + \frac{V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot Q_{1k}^i - P_{1k}^i \cdot (V_{mk}^i)^2}{(V_k^i)^3} - P_{2k}^i \quad (3.55)$$

$$d_k^i = \frac{Q_{0k}^i \cdot \left((V_{rk}^i)^2 - (V_{mk}^i)^2 \right) - 2 \cdot V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot P_{0k}^i}{(V_k^i)^4} + \frac{V_{rk}^i \cdot V_{mk}^i \cdot P_{1k}^i - Q_{1k}^i \cdot (V_{rk}^i)^2}{(V_k^i)^3} - Q_{2k}^i \quad (3.56)$$

3.5 Modelo de Barras PV

O modelo das barras PV é representado de forma diferente das barras PQ no método. Isso porque para barras PV, a potência ativa e módulo da tensão são mantidas constantes em todo o processo enquanto que nas barras PQ são constantes potência ativa e reativa.

Primeiramente, para uma barra “k” tipo PV ligada por uma linha com outra barra “m” tipo PQ com admitância dada pela equação (3.24) tem-se a nova atualização.

$$\left[Y_{km}^{\bullet\bullet} \right]^{(abc)} = \begin{bmatrix} G_{km}^{aa} - B_{km}^{aa} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & G_{km}^{ab} - B_{km}^{ab} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & G_{km}^{ac} - B_{km}^{ac} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & 0 \\ G_{km}^{ba} - B_{km}^{ba} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & G_{km}^{bb} - B_{km}^{bb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & G_{km}^{bc} - B_{km}^{bc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & 0 \\ G_{km}^{ca} - B_{km}^{ca} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & G_{km}^{cb} - B_{km}^{cb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & G_{km}^{cc} - B_{km}^{cc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & 0 \\ \hline B_{km}^{aa} - G_{km}^{aa} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & B_{km}^{ab} - G_{km}^{ab} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & B_{km}^{ac} - G_{km}^{ac} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & 0 \\ B_{km}^{ab} - G_{km}^{ab} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & B_{km}^{bb} - G_{km}^{bb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & B_{km}^{bc} - G_{km}^{bc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & 0 \\ B_{km}^{ca} - G_{km}^{ca} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & B_{km}^{cb} - G_{km}^{cb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & B_{km}^{cc} - G_{km}^{cc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Enquanto que para atualização da diagonal principal desta mesma barra “k” o bloco correspondente no Jacobiano é expresso na equação 3.58.

$$\left[Y_{kk}^{**} \right]^{(abc)} = \begin{bmatrix}
G_{km}^{aa} - B_{km}^{aa} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & G_{km}^{ab} - B_{km}^{ab} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & G_{km}^{ac} - B_{km}^{ac} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & \frac{V_{rk}^a}{(V_k^a)^2} & 0 & 0 \\
G_{km}^{ba} - B_{km}^{ba} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & G_{km}^{bb} - B_{km}^{bb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & G_{km}^{bc} - B_{km}^{bc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & \frac{V_{rk}^b}{(V_k^b)^2} & 0 \\
G_{km}^{ca} - B_{km}^{ca} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & G_{km}^{cb} - B_{km}^{cb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & G_{km}^{cc} - B_{km}^{cc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & \frac{V_{rk}^c}{(V_k^c)^2} \\
\hline
B_{km}^{aa} - G_{km}^{aa} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & B_{km}^{ab} - G_{km}^{ab} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & B_{km}^{ac} - G_{km}^{ac} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & -\frac{V_{mk}^a}{(V_k^a)^2} & 0 & 0 \\
B_{km}^{ab} - G_{km}^{ab} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & B_{km}^{bb} - G_{km}^{bb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & B_{km}^{bc} - G_{km}^{bc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & -\frac{V_{mk}^b}{(V_k^b)^2} & 0 \\
B_{km}^{ca} - G_{km}^{ca} \cdot \frac{V_{mk}^a}{V_{rk}^a} & B_{km}^{cb} - G_{km}^{cb} \cdot \frac{V_{mk}^b}{V_{rk}^b} & B_{km}^{cc} - G_{km}^{cc} \cdot \frac{V_{mk}^c}{V_{rk}^c} & 0 & 0 & -\frac{V_{mk}^c}{(V_k^c)^2}
\end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Os elementos desta última, B', B'', G', G'' , são os mesmos calculados nas equações (3.49) a (3.52).

O resultado do problema $\Delta V = J^{-1} \cdot \Delta I$ para as barras PQ fornece o resíduo do vetor tensão real e imaginário que deverá ser somado com seu respectivo vetor tensão para atualizá-lo.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{rk}^{(abc)} \\ \Delta V_{imk}^{(abc)} \end{bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_{imk}^{(abc)} \\ \Delta I_{rk}^{(abc)} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rk}^{(abc)} \\ V_{imk}^{(abc)} \end{bmatrix}^{i+1} = \begin{bmatrix} V_{rk}^{(abc)} \\ V_{imk}^{(abc)} \end{bmatrix}^i + \begin{bmatrix} \Delta V_{rk}^{(abc)} \\ \Delta V_{imk}^{(abc)} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Já para as barras PV, o resultado da equação (3.59) fornecem outras variáveis:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{imk}^{(abc)} \\ \Delta Q_k^{(abc)} \end{bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_{imk}^{(abc)} \\ \Delta I_{rk}^{(abc)} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

e assim acha-se o resíduo de tensão real para cada iteração como segue:

$$\Delta V_{rk}^{(abc)} = -\frac{V_{imk}^{(abc)}}{V_{rk}^{(abc)}} \cdot \Delta V_{imk}^{(abc)} \quad (3.62)$$

Depois de calculado este valor, utiliza-se a equação (3.60) para atualizar as tensões para a próxima iteração.

O resíduo de potência reativa, resultado do problema de barras PV, é utilizado como umas das variáveis do teste de convergência.

3.6 Algoritmo do Método

- 1º) Montar a matriz Y_{barra} do sistema, de acordo com a equação (3.24);
- 2º) A partir dos elementos $G+jB$ montar a matriz de admitância retangular, de acordo com a equação (3.29);
- 3º) Montar o vetor tensão retangular de acordo com as equações (3.23) e (3.29);
- 4º) Calcular o vetor de corrente injetada a partir da equação (3.29);
- 5º) Definir as potências especificadas de acordo com (3.41) e (3.42) e calcular os resíduos de potência das barras PQ de acordo com (3.37) e (3.38);
- 6º) Verificar a convergência do processo. Se $\max(\Delta P_k^{PQ}, \Delta Q_k^{PQ}, \Delta P_k^{PV}) < \varepsilon$ então o processo pára pois já convergiu. Caso contrário continuar de acordo com o passo 7;
- 7º) Atualizar a matriz “Jacobiano” de acordo com as equações (3.49) a (3.56) e calcular, também, o vetor diferença de tensão em cada barra de acordo com (3.47);
- 8º) Atualizar as tensões das barras de acordo com a equação (3.60);
- 9º) Incrementar o contador de iterações e voltar para o passo 4 até que o processo convirja para um valor especificado.

A Figura 3.2 mostra o fluxograma do MICT de uma forma mais resumida.

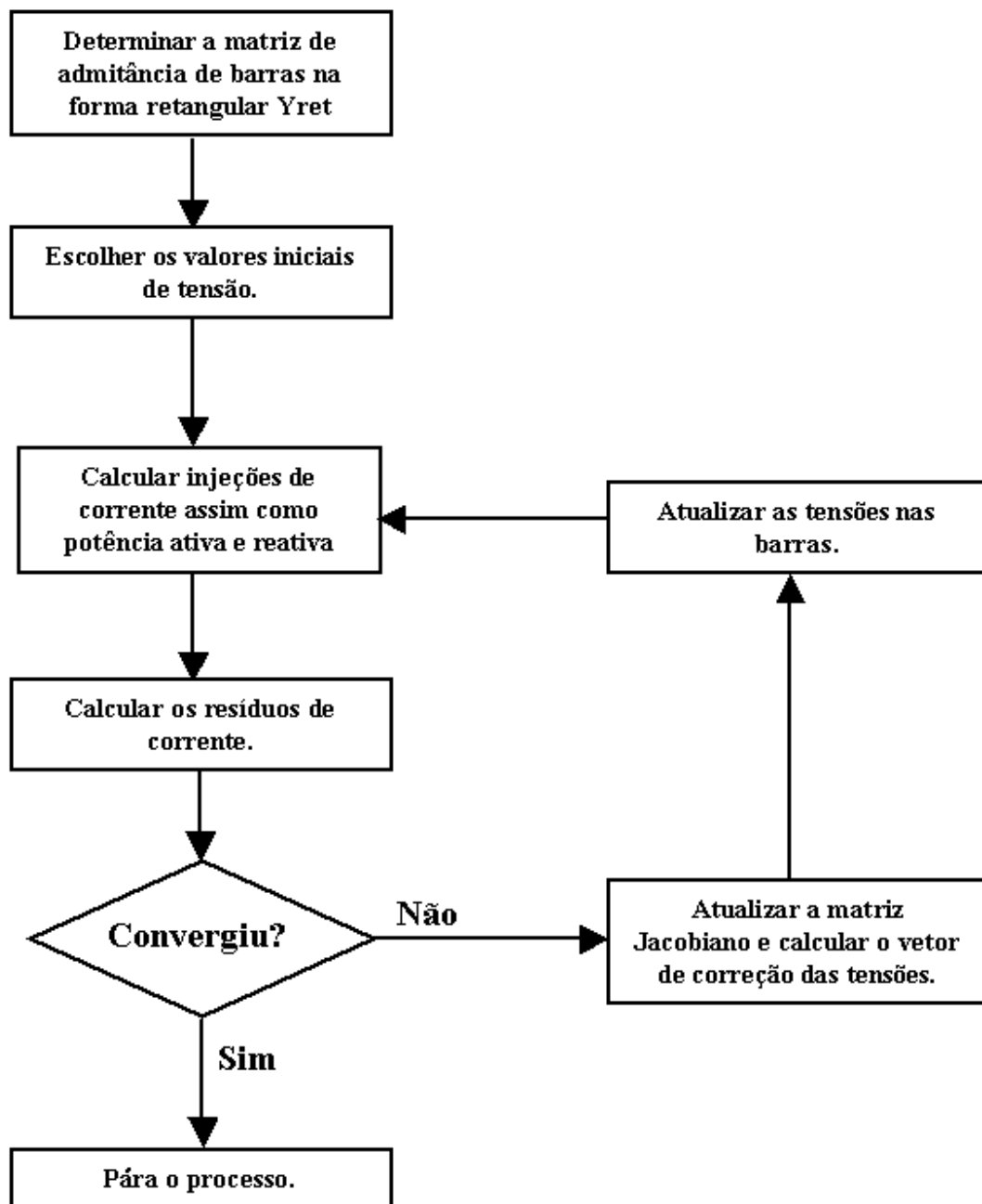


Figura 3.2 – Fluxograma do Método de Injeção de Correntes Trifásico

3.7 Comparação dos Métodos

O Método Newton-Raphson com a formulação de injeção de correntes em coordenadas retangulares apresenta algumas vantagens. São elas:

- Os elementos fora da diagonal principal na matriz Jacobiano são iguais aos elementos da matriz de admitância nodal na forma retangular, não precisando de alterações.
- Para as barras PQ, somente os elementos da diagonal principal são atualizados. Para elementos que representam barras PV, é atualizada cada coluna referente a essa barra.

Obter a matriz Jacobiano é fácil, já que a matriz admitância é conhecida e poucos elementos são atualizados ao longo do programa, tornando o tempo de simulação muito menor do que o método clássico.

No método clássico, de coordenadas polares, para um sistema com “n” barras sendo a barra “k” do tipo PV tem-se a seguinte formação do Jacobino:

$$J = \left[\begin{array}{cccc|ccc} H_{1,1} & H_{1,2} & \cdots & H_{1,k-1} & N_{1,k} & \cdots & N_{1,n} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \cdots & H_{2,k-1} & N_{2,k} & \cdots & N_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{k-1,1} & M_{k-1,2} & \cdots & M_{k-1,k-1} & N_{k-1,k} & \cdots & N_{k-1,n} \\ \hline M_{k,1} & M_{k,2} & \cdots & M_{k,k-1} & L_{k,k} & \cdots & L_{k,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n,1} & M_{n,2} & \cdots & M_{n,k-1} & L_{n,k} & \cdots & L_{n,n} \end{array} \right] \quad (3.63)$$

Já para a formulação de injeção de correntes em coordenadas retangulares, tem-se:

$$J = \left[\begin{array}{cccc|c} Y_{11}^* & \cdots & Y_{1k}^{**} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & \cdots & Y_{kk}^{**} & \cdots & Y_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nk}^{**} & \cdots & Y_{nn}^* \end{array} \right] \quad (3.64)$$

Somente os elementos Y^*, Y^{**} são atualizados enquanto que os demais são idênticos à matriz admitância já formada. Assim, estes últimos não precisam ser alterados, diminuindo então, o esforço computacional do programa.

A Figura 3.3 mostra os elementos que são atualizados na matriz Jacobiano para um sistema com 6 barras, sendo a barra número 5 do tipo PV, para o método de injeção de correntes na forma retangular. Os pontos representam os elementos atualizados no processo, enquanto o restante da matriz não sofre alterações.

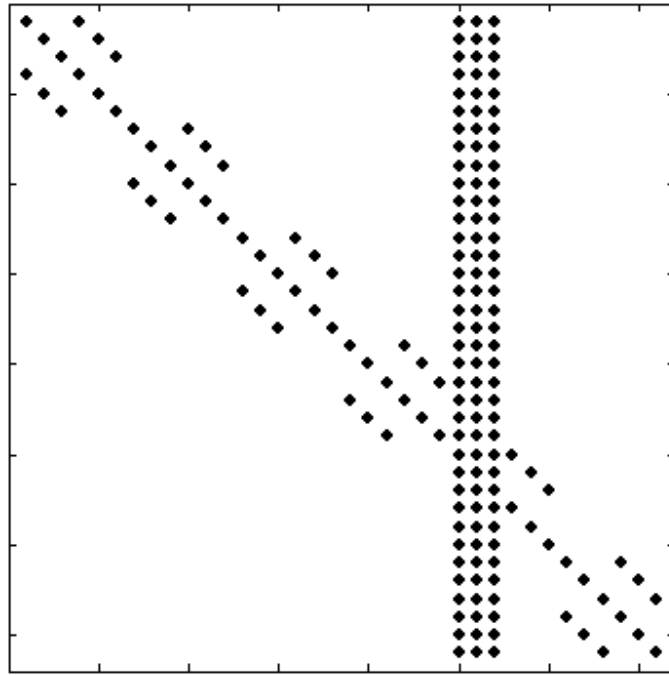


Figura 3.3 – Elementos Atualizados no MICT

Capítulo 4 – Programa Desenvolvido

4.1 Apresentação do Programa

O programa desenvolvido tem sua apresentação mostrada na Figura 4.1.

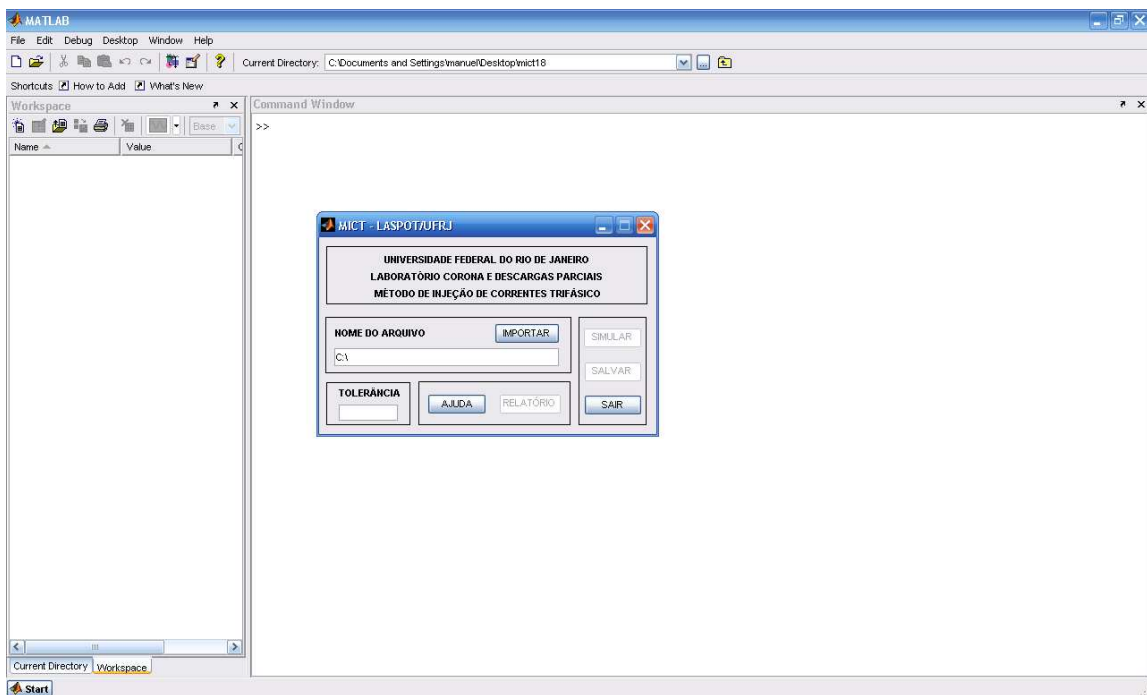


Figura 4.1 – Apresentação Inicial do MICT em Matlab

A Figura 4.1 mostra a apresentação inicial quando é solicitado o programa. Procurou-se fazer uma apresentação simples de forma que não haja dificuldade em realizar uma simulação.

4.2 Opção Ajuda

Criou-se um menu “Ajuda” para auxiliar nas primeiras simulações. A Figura 4.2 mostra como é apresentada essa opção no Matlab. Essa opção explica todos os procedimentos a serem realizados pelo usuário para uma correta simulação de fluxo de potência.

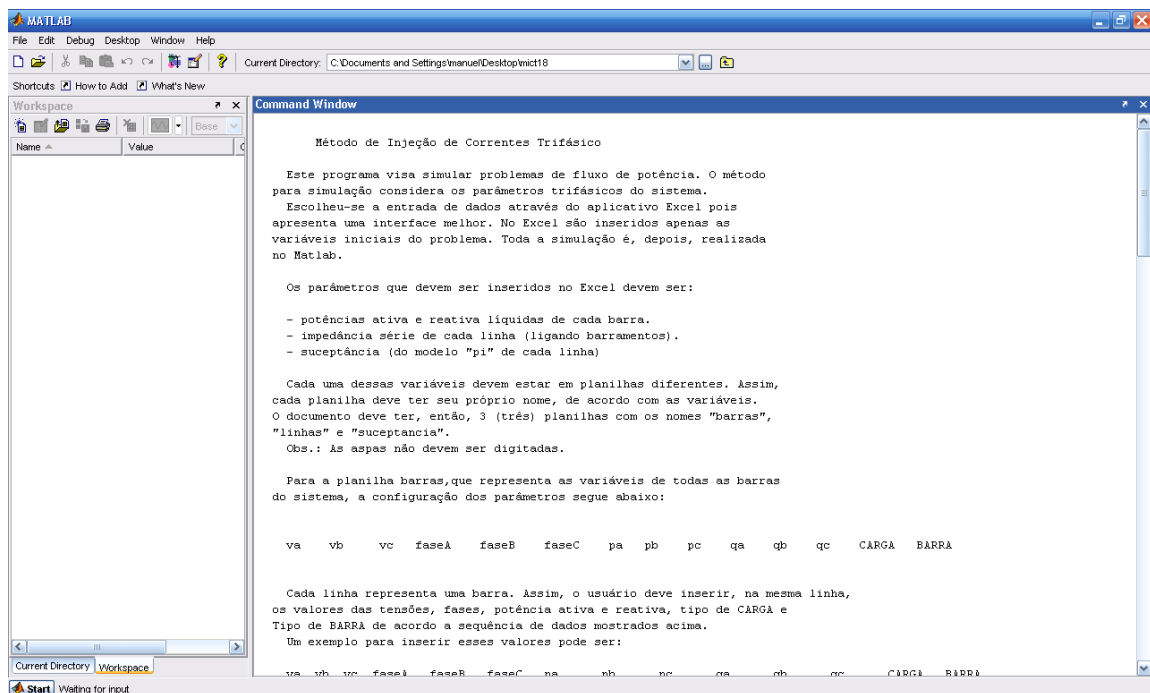


Figura 4.2 – Menu Ajuda

Para dar início à simulação, é solicitado do nome do arquivo salvo em arquivo do tipo “Excel”.

Foi escolhida a entrada de dados através de uma planilha Excel, pois este tem uma apresentação melhor que o Matlab. Fica mais fácil visualizar e adotar os valores de cada parâmetro do sistema numa planilha Excel do que inserindo cada valor no Matlab.

O usuário deve digitar o nome do documento que contem os parâmetros de entrada e a tolerância para a convergência da simulação. Quanto menor o valor da tolerância, maior será o número de iterações exigidas para convergência da solução e mais próxima da solução real estará a resposta.

4.3 Tela de Resultados

Os resultados da simulação tais como valores de tensões e suas respectivas fases, correntes, potência ativa e reativa são mostrados na área de trabalho, assim como o tempo total de simulação e o número total de iterações para convergência dos valores.

Também são mostrados dois gráficos que representam os módulos das tensões e correntes de cada barra e potência líquida, ativa e reativa, para cada fase. A Figura 4.3 mostra a tela de resultados.

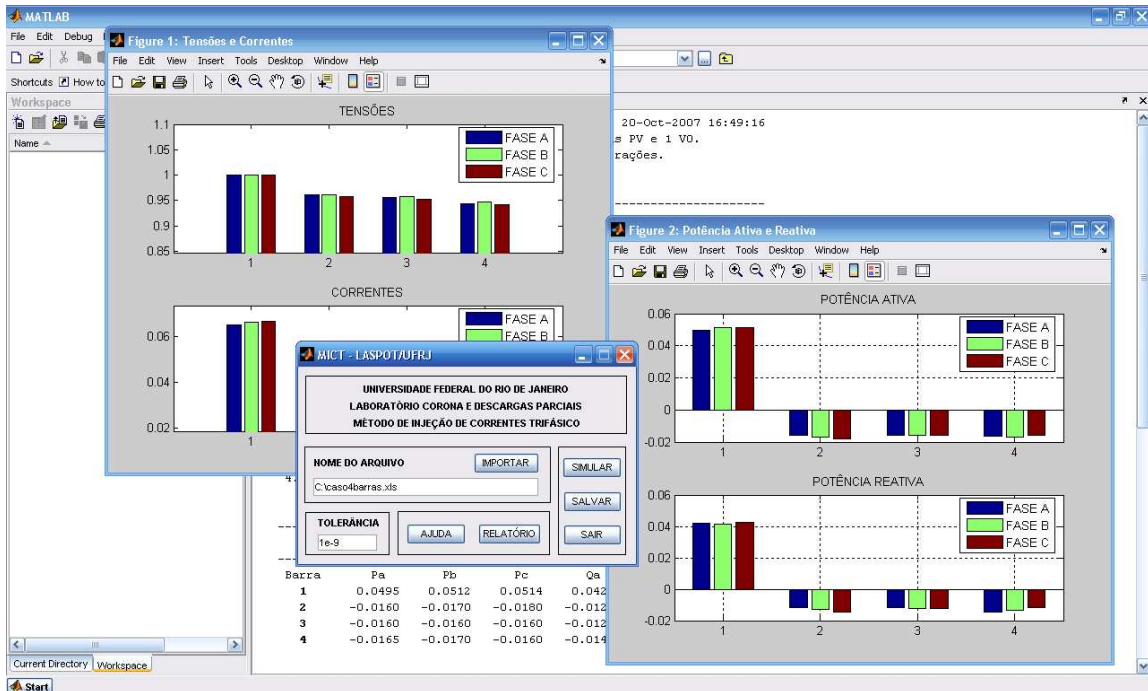


Figura 4.3 – Tela de resultados de uma simulação

Essa última figura mostra o resultado de uma simulação para um sistema com 4 barras. A Figura 4.4 mostra o relatório gerado pelo programa depois de realizada uma simulação.

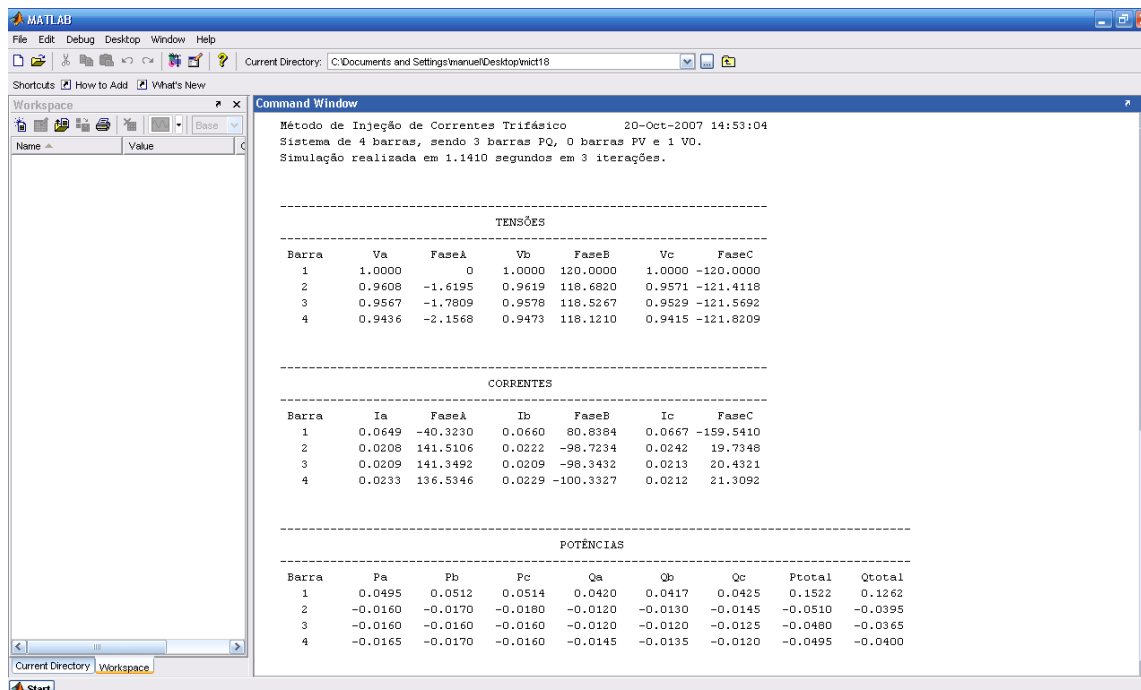


Figura 4.4 – Resultado no “workspace” para simulação de 4 barras

O usuário poderá perceber a velocidade do algoritmo em resolver problemas de fluxo de potência. Na simulação acima, o tempo de solução foi de 1,14 segundos com apenas 3 iterações.

O Método Newton-Raphson clássico apresentará um tempo de simulação maior quando comparado com método de formulação de injeção de correntes, para o mesmo sistema. Para este caso a diferença é pequena, mas para casos com elevado número de barras, a diferença de tempo de resposta pode ser considerável.

4.4 Observações

Para realizar uma simulação, deve-se escolher como diretório corrente o caminho do programa, como explicado na Figura 4.5.

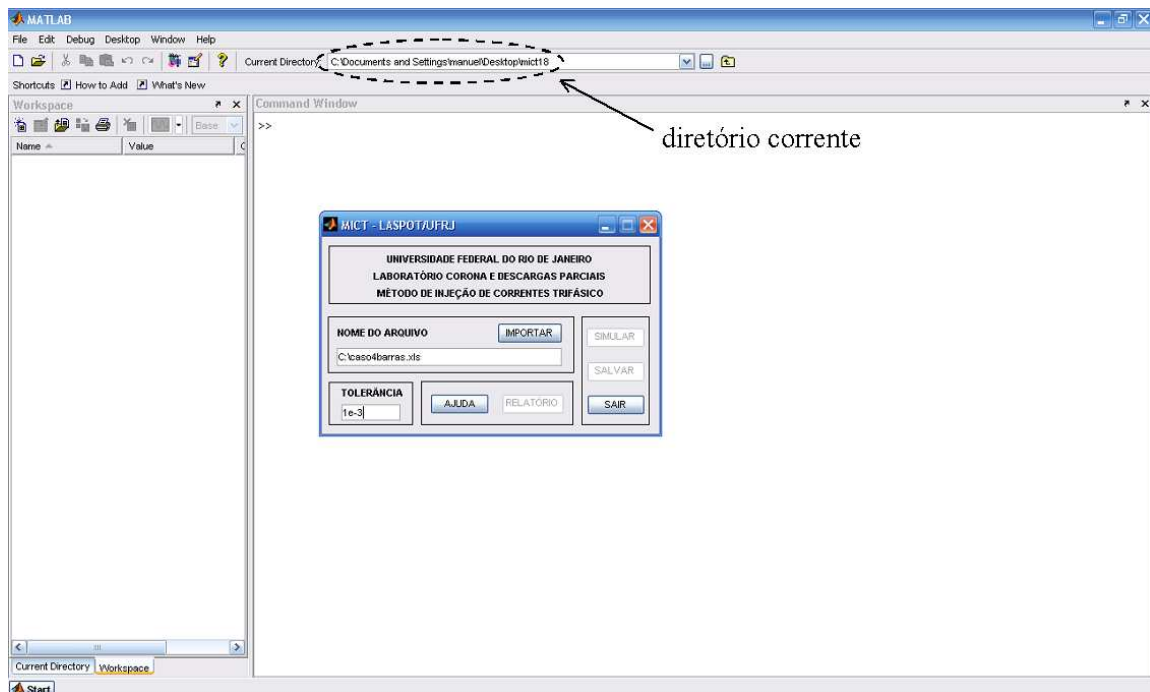


Figura 4.5 – Explicação do Diretório corrente

4.5 Entrada de dados no Excel

Como exposto anteriormente, o único motivo de se usar o Excel está na facilidade para definir os parâmetros de entrada.

Na Figura 4.6 tem-se a apresentação do documento excel “padrão.xls”. Este é o documento que deverá ser usado inicialmente. O usuário pode utilizar esse documento e “salvar como” outro nome para diferenciar os casos estudados.

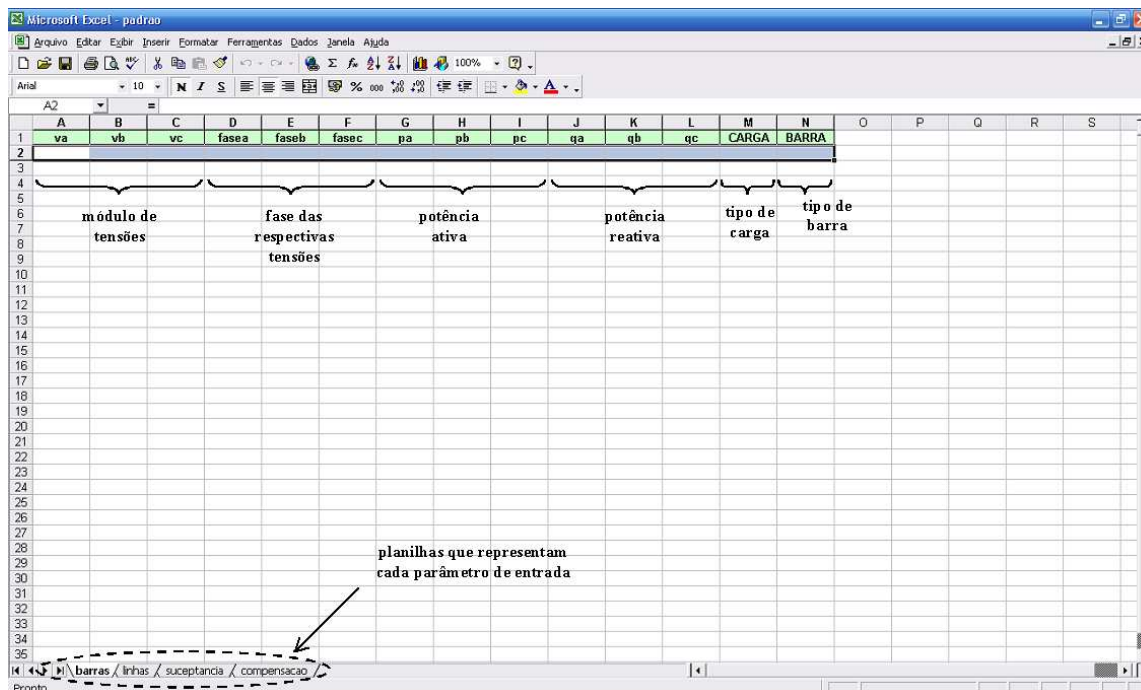


Figura 4.6 – Entrada dos dados de barras

A parte circutada na Figura 4.6 representa as planilhas onde deverão ser inseridos os valores de cada parâmetro. As planilhas são: barras, linhas, susceptância e compensação. Nesta última figura é mostrada a planilha barras. A Figura 4.7 mostra a planilha linhas e explica a entrada de dados.

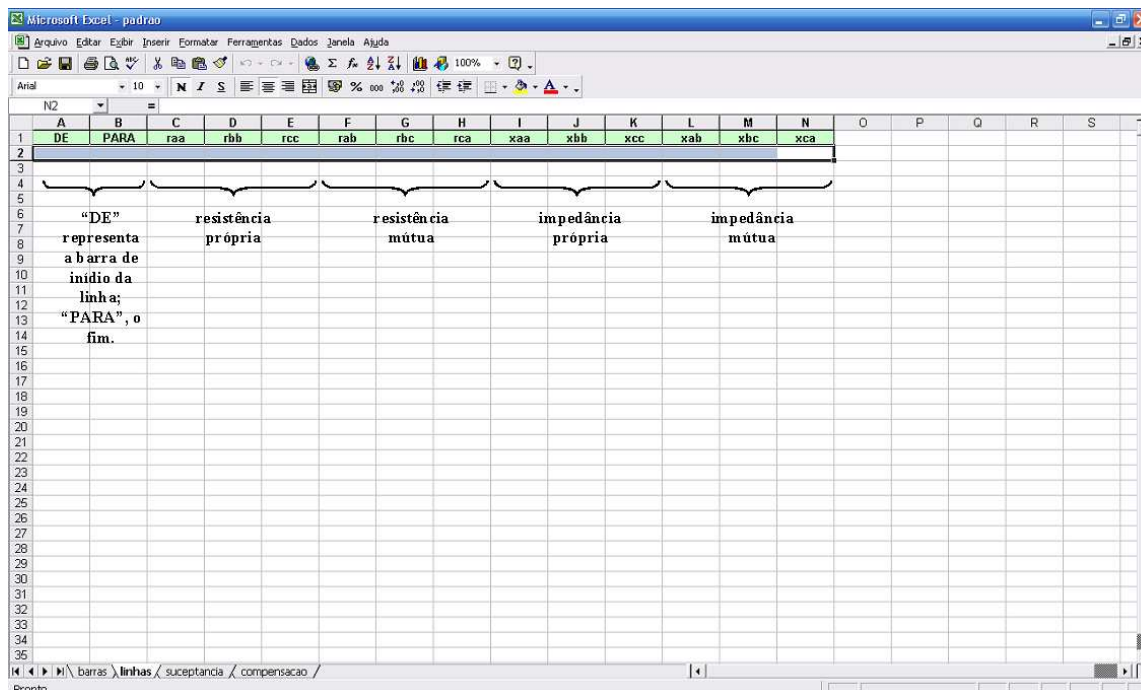


Figura 4.7 – Entrada de dados das linhas

Na planilha “linhas” não são inseridos os valores dos elementos em derivação. Estes são inseridos na planilha “susceptância”. Estes valores são relativos às linhas do sistema. A Figura 4.8 mostra como inserir valores dos parâmetros derivação.

A última planilha representa a compensação de cada barramento, ou seja, se houver banco de capacitores em determinada barra, este deve ser inserido na simulação através da planilha “compensação”. A Figura 4.9 mostra esses parâmetros.

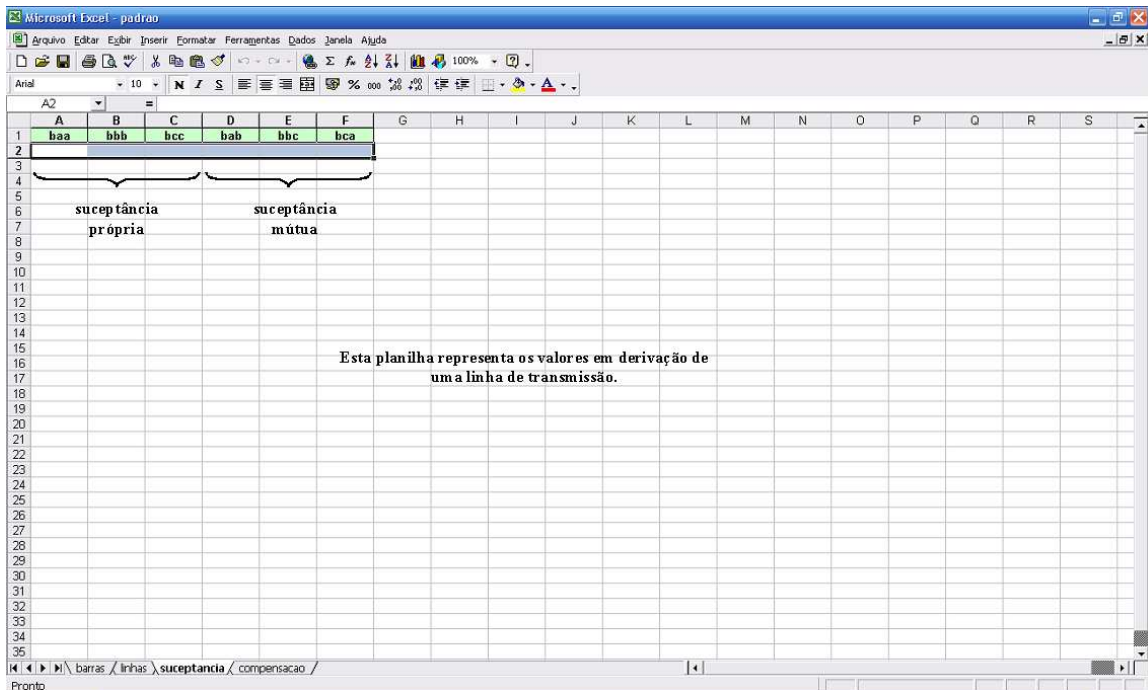


Figura 4.8 – Parâmetros em derivação de linha de transmissão

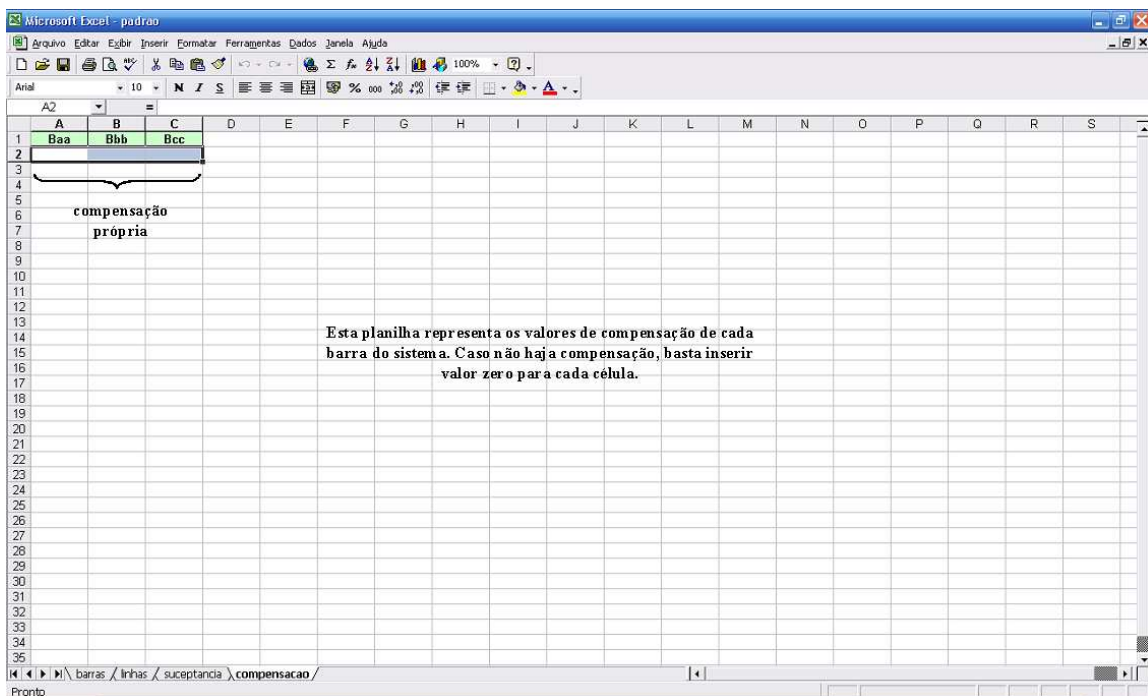


Figura 4.9 – Parâmetros de compensação de barras

Capítulo 5 – Simulações

Este capítulo mostra algumas soluções através da formulação no Método de Injeção de Correntes Trifásico. A proposta é simular um sistema já conhecido e comparar com os resultados obtidos pelo programa. Os sistemas testes foram retirados das referências [1-2] e [14].

5.1 Caso 3 barras

O sistema radial de três barras é apresentado na Figura 5.1, [14]. O gerador está ligado na barra 1 enquanto que as outras cargas estão nas barras 2 e 3.

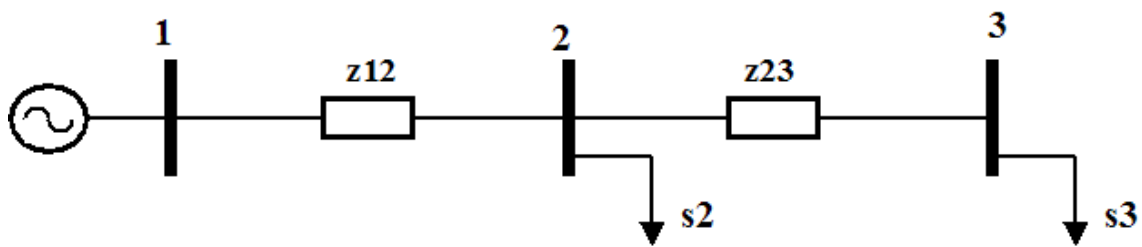


Figura 5.1 – Diagrama Unifilar do sistema de 3 barras

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram os dados de barras e linhas do sistema, respectivamente. Todos os valores estão em pu. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1 - Dados de barras

barra	Tensão	fase	P	Q
1	1,05	0	0	0
2	1	0	-0,6	-0,4
3	1	0	-1	-0,45

Tabela 5.2 - Dados de linhas

de	para	r	x
1	2	0,01	0,03
2	3	0,005	0,015

Tabela 5.3 - Resultado de Tensões

barra	Tensão (pu)	Fase (grau)
1	1,05	0
2	1,0075	-2,1399
3	0,99559	-2,8683

Tabela 5.4 - Resultado do Fluxo de Potência

k	m	Pkm	Pmk	perdasP	Qkm	Qmk	perdasQ
1	2	1,6389	-1,6061	0,032839	0,96672	-0,8682	0,098518
2	3	1,0061	-1	0,0060659	0,4682	-0,45	0,018198

5.2 Comparação entre o Método Varredura e MICT

Nesta seção é feita uma comparação entre o Método Varredura e o Método de Injeção de Correntes Trifásico.

O procedimento para realizar a comparação foi aumentar, gradativamente, a carga total do sistema 3 barras e verificar o número de iterações para convergência da solução. A Tabela 5.5 mostra os resultados para ambos os métodos.

Percebe-se que os resultados para tensão, fase, potência ativa e reativa são iguais para qualquer fator de carregamento, validando o programa MICT desenvolvido.

Para o Método Varredura, o número de iterações cresce rapidamente com o aumento do carregamento do sistema, o que era esperado. Para um fator de carga (múltiplo da carga nominal do sistema) maior que 4,4, percebe-se que não há convergência da solução, enquanto que para o MICT há solução.

A Figura 5.2 mostra o rápido crescimento de iterações exigidas para convergência em função do carregamento do sistema para o Método Varredura. Os valores calculados estão na Tabela T5.6.

Tabela 5.5 – Comparação entre o Método Varredura e MICT

Fator de Carga	Barra	Varredura					MICT				
		V	fase	P	Q	iterações	V	fase	P	Q	iterações
1	1	1,0500	0,0000	1,6389	0,9667	10	1,0500	0,0000	1,6389	0,9667	8
	2	1,0075	-2,1399	-0,6000	-0,4000		1,0075	-2,1399	-0,6000	-0,4000	
	3	0,9956	-2,8683	-1,0000	-0,4500		0,9956	-2,8683	-1,0000	-0,4500	
1,5	1	1,0500	0,0000	2,4928	1,5533	13	1,0500	0,0000	2,4928	1,5533	9
	2	0,9835	-3,2892	-0,9000	-0,6000		0,9835	-3,2892	-0,9000	-0,6000	
	3	0,9650	-4,4438	-1,5000	-0,6750		0,9650	-4,4438	-1,5000	-0,6750	
2	1	1,0500	0,0000	3,3761	2,2284	16	1,0500	0,0000	3,3761	2,2284	11
	2	0,9571	-4,5085	-1,2000	-0,8000		0,9571	-4,5085	-1,2000	-0,8000	
	3	0,9315	-6,1474	-2,0000	-0,9000		0,9315	-6,1474	-2,0000	-0,9000	
2,5	1	1,0500	0,0000	4,2970	3,0159	18	1,0500	0,0000	4,2970	3,0159	12
	2	0,9277	-5,8186	-1,5000	-1,0000		0,9277	-5,8186	-1,5000	-1,0000	
	3	0,8942	-8,0208	-2,5000	-1,1250		0,8942	-8,0208	-2,5000	-1,1250	
3	1	1,0500	0,0000	5,2682	3,9547	24	1,0500	0,0000	5,2682	3,9547	15
	2	0,8940	-7,2524	-1,8000	-1,2000		0,8940	-7,2524	-1,8000	-1,2000	
	3	0,8515	-10,1330	-3,0000	-1,3500		0,8515	-10,1330	-3,0000	-1,3500	
3,5	1	1,0500	0,0000	6,3140	5,1169	32	1,0500	0,0000	6,3140	5,1169	18
	2	0,8539	-8,8703	-2,1000	-1,4000		0,8539	-8,8703	-2,1000	-1,4000	
	3	0,8007	-12,6130	-3,5000	-1,5750		0,8007	-12,6130	-3,5000	-1,5750	
4	1	1,0500	0,0000	7,4905	6,6716	54	1,0500	0,0000	7,4905	6,6716	23
	2	0,8023	-10,8100	-2,4000	-1,6000		0,8023	-10,8100	-2,4000	-1,6000	
	3	0,7354	-15,7700	-4,0000	-1,8000		0,7354	-15,7700	-4,0000	-1,8000	
4,4	1	1,0500	0,0000	8,6629	8,6086	215	1,0500	0,0000	8,6629	8,6086	34
	2	0,7403	-12,9200	-2,6400	-1,7600		0,7403	-12,9200	-2,6400	-1,7600	
	3	0,6566	-19,5480	-4,4000	-1,9800		0,6566	-19,5480	-4,4000	-1,9800	
4,5	1	##	##	##	##	indefinido	1,0500	0,0000	9,0541	9,3874	43
	2	##	##	##	##		0,7159	-13,6790	-2,7000	-1,8000	
	3	##	##	##	##		0,6254	-21,0420	-4,5000	-2,0250	

Tabela 5.6 – Carregamento Limite do Caso 3 barras

fator de carga	Iterações
4,4	215
4,41	239
4,42	272
4,43	316
4,44	380
4,45	480
4,46	662
4,47	1093
4,48	3411
4,481	4358
4,482	6047
4,483	9906
4,484	27669
4,485	indefinido

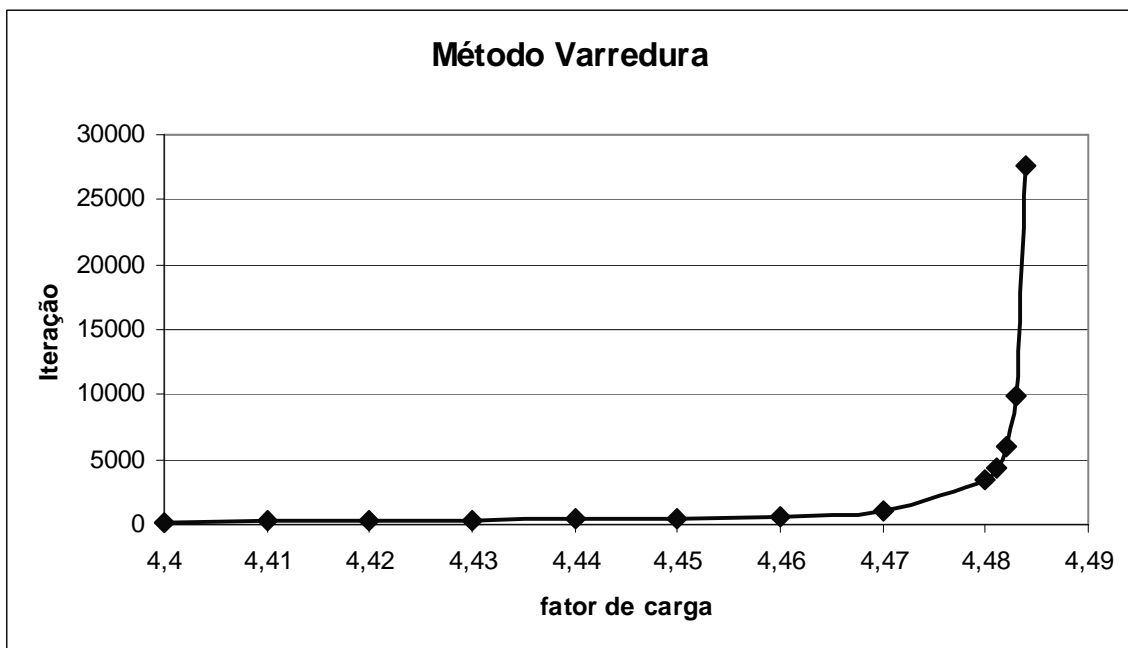


Figura 5.2 – Variação do fator de carga x número de iterações no Método Varredura

Pela Tabela 5.6, percebe-se que não há convergência da solução para um fator de carregamento superior a 4,484. Neste sistema de três barras, o máximo fator de carregamento com solução é $fc_{varredura} = 4,484$ para o Método Varredura.

O MICT continua apresentando solução, o que o torna mais robusto e numericamente mais estável.

O fator de carga limite para o MICT no mesmo sistema teste de três barras é $fc_{MICT} = 5$. Os valores dos fatores de carregamento são próximos pois o sistema teste é simples. Para sistemas mais complexos, com maior número de barras e elevado carregamento, o MICT continuará se comportando de forma mais robusta.

5.3 Caso 3 barras com elementos derivação

Neste caso tem-se uma simulação do mesmo sistema 3 barras considerando linhas médias. Assim, os valores dos elementos derivação das linhas devem ser considerados para obter resultados mais realistas. O diagrama unifilar do sistema é representado na Figura 5.3.

Os dados de barras continuam os mesmos enquanto os dados de linha são mostrados na tabela 5.7.

As simulações são realizadas com intuito de validar o programa desenvolvido para linhas médias, onde devem ser considerados os elementos derivação em cada extremidade.

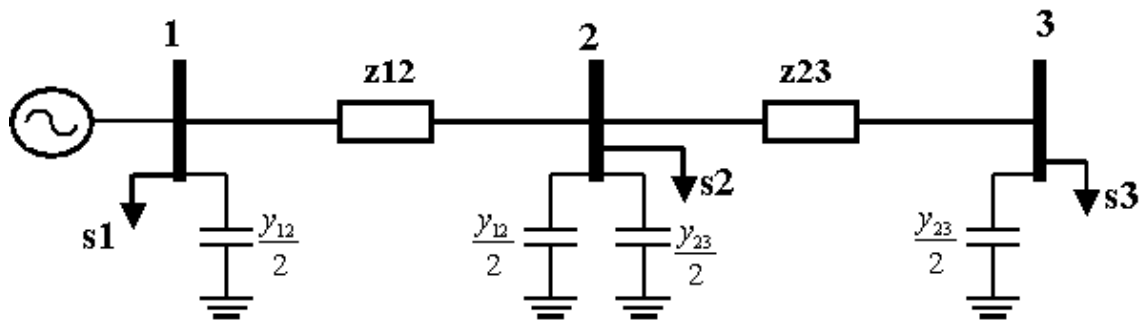


Figura 5.3 – Diagrama unifilar do caso 3 barras com elementos derivação

Tabela 5.7 - Dados de linhas

de	para	r	x	y_{sh}
1	2	0,02	0,06	0,002
2	3	0,01	0,03	0,001

Os resultados das simulações do Método Varredura e MICT para o caso 3 barras de linhas médias, ou seja, com elementos derivação, são mostrados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Comparação entre os métodos para o caso 3 barras

fator de carga	Barra	Varredura		Iterações	MICT		Iterações	Erro	
		v	fase		v	fase			
1	1	1,05	0	13	1,05	0	8	0,00%	0,00%
	2	0,95723	-4,5096		0,9574	-4,5111		0,02%	0,03%
	3	0,93162	-6,1483		0,93182	-6,1495		0,02%	0,02%
1,5	1	1,05	0	17	1,05	0	11	0,00%	0,00%
	2	0,89408	-7,2531		0,89427	-7,2533		0,02%	0,00%
	3	0,85157	-10,133		0,85179	-10,132		0,03%	0,01%
2	1	1,05	0	39	1,05	0	17	0,00%	0,00%
	2	0,80239	-10,81		0,80264	-10,808		0,03%	0,02%
	3	0,7355	-15,768		0,73579	-15,762		0,04%	0,04%
2,2	1	1,05	0	145	1,05	0	25	0,00%	0,00%
	2	0,74043	-12,919		0,74079	-12,914		0,05%	0,04%
	3	0,65677	-19,544		0,65721	-19,531		0,07%	0,07%
2,25	1	###	###	###	1,05	0	31	###	###
	2	###	###		0,71651	-13,668		###	###
	3	###	###		0,62621	-21,015		###	###

A Figura 5.4 mostra o número de iterações exigidas para diferentes níveis de carregamento do sistema 3 barras considerando linhas médias.

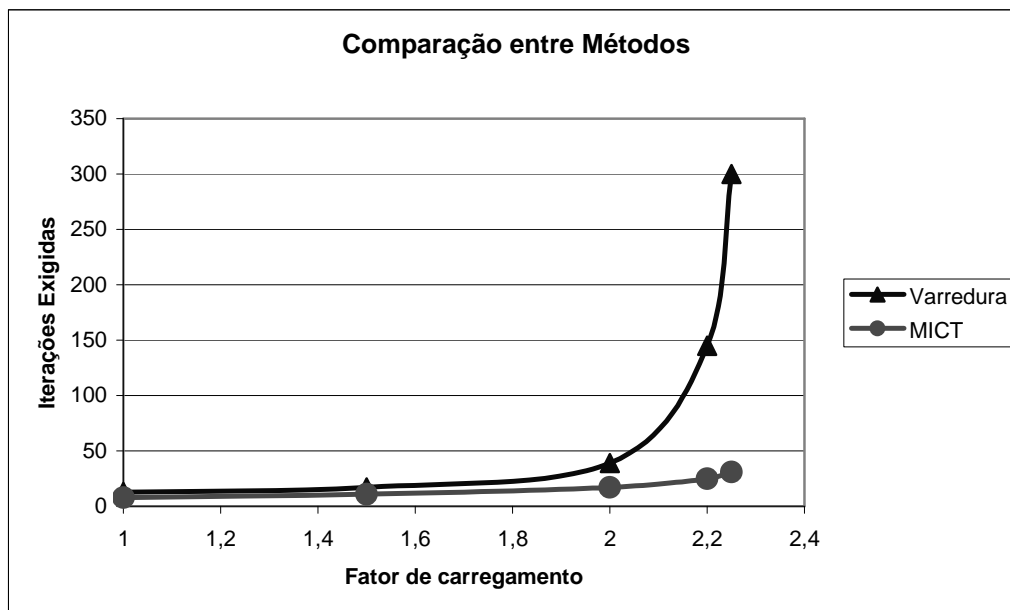


Figura 5.4 – Número de Iterações exigidas para simulação x fator de carregamento

A tabela 5.8 mostra que as diferenças entre os resultados obtidos nas simulações e os resultados esperados apresentam erros muito pequenos. Percebe-se que o maior erro é da ordem de 0,07%. Estes valores levam a crer que o programa desenvolvido em Matlab é válido, pois o programa apresenta resultados coerentes, próximos dos valores reais.

5.4 Caso 4 barras com 1 barra PV

Este caso foi retirado da referência [2] com o intuito de validar o programa quando inserida uma barra PV no sistema de potência. O sistema obtido representa um exemplo resolvido através do Método de Newton-Rapshon clássico.

O diagrama unifilar é mostrado na Figura 5.5 enquanto que seus dados de barras e linhas são mostrados nas tabelas 5.9 e 5.10, respectivamente.

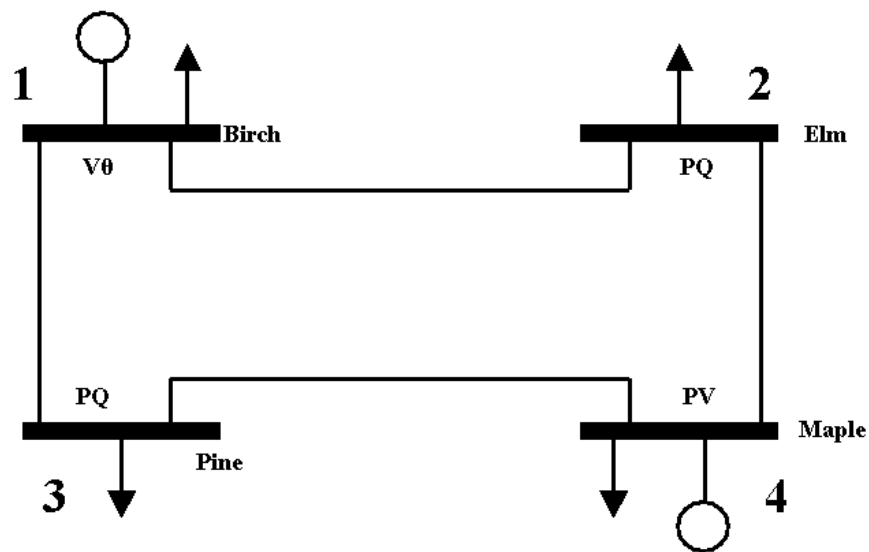


Figura 5.5 – Diagrama Unifilar do Sistema 4 barras

Tabela 5.9 – Dados de barras do sistema com barra PV

Barra	Tensão		Geração		Carga		Tipo
	V	fase	P	Q	P	Q	
1	1	0	-	-	50	30,99	Swing
2	0,983	-0,977	-	-	170	105,35	PQ
3	0,969	-1,869	-	-	200	123,94	PQ
4	1,02	1,5163	318	-	80	49,58	PV

Tabela 5.10 – Dados de linha do sistema com barra PV

linha	R	X	G	B	Y/2
1-2	0,01008	0,0504	3,815629	-19,0781	0,05125
1-3	0,00744	0,0372	5,169561	-25,8478	0,03875
2-4	0,00744	0,0372	5,169561	-25,8478	0,03875
3-4	0,01272	0,0636	3,023705	-15,1185	0,06375

Os valores da tabela 5.9 estão na base de 100MVA, 230 kV.

5.5 Resultado do Caso 4 barras

Os resultados definidos pelo exemplo da referência [2] são mostrados na Tabela 5.11 enquanto que os resultados obtidos através da simulação do caso são mostrados na Tabela 5.12.

Tabela 5.11 – Resultados Definidos

barra	Nome	V (pu)	fase	Geração		Carga		Tipo	Para Barra	Fluxo de Linha		
				P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)			Nome	P (pu)	Q (pu)
1	Birch	1,0000	0,0000	1,8681	1,1450	0,5000	0,3099	Swing	2	Elm	0,3869	0,223
									3	Pine	0,9812	0,6121
2	Elm	0,9820	-0,9760	0,0000	0,0000	1,7000	1,0535	PQ	1	Birch	-0,3846	-0,3124
									4	Maple	-1,3154	-0,7411
3	Pine	0,9690	-1,8720	0,0000	0,0000	2,0000	1,2394	PQ	1	Birch	-0,9709	-0,6357
									4	Maple	-1,0291	-0,6037
4	Maple	1,0200	1,5230	3,1800	1,8143	0,8000	0,4958	PV	2	Elm	1,3325	0,7492
									3	Pine	1,0475	0,5693

Tabela 5.12 - Resultado da simulação

Barra	V	fase	P	Q		Fluxo P	Fluxo Q
1	1	0	1,3679	0,8312	1-2	0,3869	0,2722
					1-3	0,9789	0,6469
2	0,983	-0,977	-1,7	-1,054	2-1	-0,3846	-0,2601
					2-4	-1,3128	-0,7035
3	0,969	-1,869	-2	-1,239	3-1	-0,9686	-0,5957
					3-4	-1,0264	-0,5442
4	1,02	1,5163	2,38	1,3218	4-2	1,3299	0,789
					4-3	1,0447	0,6355

A diferença dos valores deve-se ao fato de que as simulações realizadas não consideraram os valores de capacitância entre fases. Provavelmente os resultados esperados para o caso 4 barras devem envolver capacitâncias entre fases, levando os resultados a divergirem. Percebe-se que a diferença é pequena, levando a crer que os valores das simulações são válidos.

5.6 Caso 4 barras radial

Este sistema tem apenas 4 barras e foi obtido na referência [1]. Seu diagrama unifilar é mostrado na Figura 5.6 e seus parâmetros de carga e linhas são mostrados nas tabelas 5.12 e 5.13, respectivamente. Neste caso, todas as cargas são consideradas do tipo potência constante e a potência base é 100MVA.

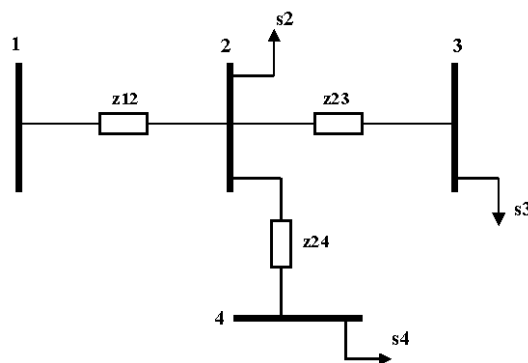


Figura 5.6 – Sistema de testes 4 barras

Tabela 5.12 - Dados de barras

	Barra1	Barra2	Barra3	Barra4
Va	1	##	##	##
Vb	1	##	##	##
Vc	1	##	##	##
qa	0	##	##	##
qb	-120	##	##	##
qc	120	##	##	##
Pa	##	0,016	0,016	0,165
Pb	##	0,017	0,016	0,017
Pc	##	0,018	0,016	0,016
Qa	##	0,012	0,012	0,145
Qb	##	0,013	0,012	0,135
Qc	##	0,014	0,125	0,012

Tabela 5.13 - Dados de linhas

	linha 1-2	linha 2-3	linha 2-4
raa	0,3136	0,1045	0,4001
rbb	0,3136	0,1045	0,4001
rcc	0,3136	0,1045	0,4001
rab	0,0801	0,0267	0,0935
rca	0,0701	0,0267	0,0935
rbc	0,0801	0,0267	0,0935
xaa	1,2261	0,4087	1,503
xbb	1,2261	0,4087	1,503
xcc	1,2261	0,4087	1,503
xab	0,5741	0,1914	0,738
xac	0,5034	0,1914	0,738
xbc	0,5741	0,1914	0,738
Ya	##	##	##
Yb	##	##	##
Yc	##	##	##

Os valores estão referidos na base $S_b = 100MVA$ e $V_b = 13,8kV$. Assim, os valores de base para impedância e corrente, são:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{13,8^2}{100} = 1,9044\Omega$$

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_b} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 4,18kA$$

5.7 Resultado do Caso 4 barras radial

Os resultados das tensões são mostrados nas Tabelas T5.14 e T5.15 de forma a serem comparados. O relatório gerado pelo programa está no Anexo1.

Tabela 5.14 - Resultados "Pré-Definidos"

	a	b	c
V1	1+j0	-0,5+j0,866	-0,5-j0,866
V2	0,9563-j0,0206	-0,4569+j,08483	-0,5009-j0,8193
V3	0,9522-j0,0232	-0,4527+j0,8458	-0,5011-j0,8145
V4	0,9369-j0,0276	-0,444+j0,8404	-0,5021-j0,7992

Tabela 5.15 - Resultados da Simulação do Programa

	a	b	c
V1	1	-0,5 + j0,86603	-0,5 - j0,86603
V2	0,9604 -j0,0271	-0,4616 + j0,8438	-0,4988 - j0,8167
V3	0,9562 -j0,0297	-0,4574 +j0,8415	-0,4988 -j0,8119
V4	0,9428 - j0,0351	-0,4464 + j0,8354	-0,4964 - j0,8000

Os resultados do fluxo de potência ativa e reativa são mostrados nas Tabelas T5.16 e T5.17.

Tabela 5.16 - Resultados definidos

linha	fluxo de potência ativa			fluxo de potência reativa		
	pa	pb	pc	qa	qb	qc
1-2	0,02432	0,02432	0,02432	0,02941	0,02941	0,02941
2-1	-0,02386	-0,02386	-0,02386	-0,02763	-0,02763	-0,02763
2-3	0,008175	0,008175	0,008175	0,007372	0,007372	0,007372
3-2	-0,008161	-0,008161	-0,008161	-0,007317	-0,007317	-0,007317
2-4	0,007451	0,007451	0,007451	0,01026	0,01026	0,01026
4-2	-0,007381	-0,007381	-0,007381	-0,00999	-0,00999	-0,00999

Tabela 5.17 - Resultados da simulação

linha	potência ativa			potência reativa		
	pa	pb	pc	qa	qb	qc
1-2	0,027072	0,026099	0,026394	0,023841	0,024311	0,030329
2-1	-0,026664	-0,0257	-0,025887	-0,022245	-0,022751	-0,028347
2-3	0,0078374	0,0082863	0,0082	0,0073704	0,0071835	0,0079418
3-2	-0,0078243	-0,0082727	-0,0081851	-0,0073193	-0,0071304	-0,0078833
2-4	0,0084519	0,0072458	0,0066411	0,0093752	0,0074089	0,0075625
4-2	-0,0083831	-0,0071994	-0,0065967	-0,0091168	-0,0072346	-0,0073955

Percebe-se que os resultados obtidos pela simulação não são exatamente iguais aos resultados esperados. Isto ocorre porque o modelo de linhas, adotado em [1], provavelmente utiliza capacitores entre fases, o que não é adotado no modelo das simulações realizadas justificando, então, a divergência entre os valores.

5.8 Conclusões

Este capítulo mostrou quatro simulações distintas. Simulações com barras PV também foram realizadas com o objetivo de validar o programa.

Determinou-se uma tolerância $\varepsilon = 10^{-09}$ para todas as simulações do sistema 3 barras e para ambos os métodos. Nas simulações, os tempos de solução dos métodos foram próximos não podendo ser feitas comparações para verificar qual método apresentou desempenho melhor.

O Método Varredura foi implementado de forma rápida, sem nenhuma complexidade. Adotou-se a rede de seqüência positiva do modelo trifásico pois o sistema foi considerado equilibrado.

O MICT teve sua implementação demasiadamente trabalhosa, como é mostrada no capítulo 3. Percebeu-se, variando o carregamento dos sistemas, que o MICT é numericamente mais estável e robusto que o Método Varredura.

Pode-se dizer que o MICT é um método mais geral porque além de ser mais robusto que o Método Varredura, pode simular sistemas com alto nível de carregamento, sem limites de anéis e com barras PV.

O programa desenvolvido não utiliza o modelo de capacitância entre fases para simulação. A consideração é feita somente para os elementos derivação, fase-terra, nas linhas de transmissão. A figura 2.2 e as equações 2.6 a 2.9 mostram as equações para esse modelo.

Os resultados obtidos das simulações 4 barras com 1 barra PV e 4 barras radial não são exatamente iguais aos resultados esperados das referências. A divergência deve-se ao fato de que o modelo adotado nas referências [1] e [2] consideram valores de capacitância entre fases enquanto que o modelo adotado nas simulações não considera esses parâmetros.

Entretanto, pode-se observar que os resultados das simulações para o caso 3 barras e 3 barras com parâmetros derivação são satisfatórios. Esses resultados validam a resposta obtida assim como o programa desenvolvido.

Capítulo 6 – Conclusões

Este projeto de graduação teve como objetivo apresentar uma implementação, em código Matlab, da solução do Método de Injeção de Correntes Trifásico.

O método apresenta algumas vantagens quando comparado com o Método “Varredura”, este que é um método bastante robusto quando simulado em sistemas radiais.

A primeira vantagem do MICT está na montagem da matriz Jacobiano, bastante semelhante à matriz de admitância do sistema. Uma segunda vantagem está na atualização dos elementos do Jacobiano. Poucos elementos são atualizados a cada iteração, o que torna a resposta da simulação mais rápida.

A facilidade de simulação de sistemas malhados sem limitações de anéis dentro do sistema representa outra grande vantagem quando comparado com o Método Varredura. Sistemas de sub-transmissão e distribuição que apresentam essa característica podem ser estudados sem nenhuma limitação.

A interface foi desenvolvida da forma mais simples possível, objetivando a não haver dúvidas nas simulações.

Os resultados apresentados para os casos foram satisfatórios, pois apresentaram coerência quando comparados com os resultados definidos. A semelhança dos resultados obtidos com os definidos leva a crer que a implementação do método está correta, validando, a princípio, seus resultados. O Anexo 1 mostra outra simulação para um sistema de 13 barras.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma das propostas para melhorar o programa está na implementação matemática de modelos de Compensadores Estáticos de Reativo (CER) e Capacitores Série Controlados por Tiristores (CSCT), como visto em [10] e [11].

A inserção desses novos elementos torna o estudo de sistemas de potência através do MICT mais completo, levando as simulações a resultados mais confiáveis.

Implementar no programa transformadores de potência e reguladores de tensão de forma mais detalhada também é interessante, já que estes são componentes fundamentais em sistemas de potência.

Referências Bibliográficas

- [1] Paulo Augusto N. Garcia, Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição: Uma Formulação Trifásica Alternativa, Dissertação de Mestrado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fevereiro de 1998
- [2] John J. Grainger, William D. Stevenson, Power System Analysis, McGraw-Hill International Editions, 1994,
- [3] A. E. Fitzgerald, Electric Machinery, McGraw-Hill International Editions, 1990
- [4] V. M. da Costa, Uma Formulação Alternativa para o Problema de Fluxo de Potência, Tese de Doutorado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro de 1997
- [5] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, and G.X. Luo, “A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, May 1988.
- [6] Fernando Monteiro Cima, Utilização de Indicadores Energéticos no Planejamento Energético Integrado, Dissertação de Mestrado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fevereiro de 2006
- [7] Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, Fluxo de Potência em Sistema de Distribuição: Uma Formulação Trifásica Alternativa, Dissertação de Mestrado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fevereiro de 1998
- [8] Carlos Aparecido Ferreira, Novas Aplicações da Formulação de Injeção de Corrente em Sistemas Elétricos de Potência, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Dezembro de 2003

[9] Fabrício Luiz Silva, Modelagem de Transformadores Trifásicos de Distribuição para Estudos de Fluxo de Potência, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Setembro de 2004

[10] Paulo A. N. Garcia, José L. R. Pereira e Sandoval Carneiro Jr., Fluxo de Potência Trifásico por Injeção de Corrente: Parte 1 – Formulação Básica, Revista Controle & Automação Vol.12 no.03/Set., Out., Nov. e Dezembro 2001

[11] Paulo A. N. Garcia, José L. R. Pereira e Sandoval Carneiro Jr., Fluxo de Potência Trifásico por Injeção de Corrente: Parte 2 – Controles e Dispositivos FACTS, Revista Controle & Automação Vol.12 no.03/Set., Out., Nov. e Dezembro 2001

[12] Paulo A. N. Garcia, Cálculo do Fluxo de Potência Trifásico em Sistemas de Distribuição Incluindo a Representação de Dispositivos de Controle, Tese de Doutorado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fevereiro de 2001

[13] Monticelli, A. J., Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.

[14] Silveira, C. S., Estudos de Máximo Carregamento em Sistemas de Energia Elétrica, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2003

Páginas na Internet:

[15] <http://www.iea.org>

[16] <http://mapas.ibge.gov.br/>

[17] <http://www.ons.org.br>

[18] http://www.mme.gov.br/programs_display.do?prg=5

[19] <http://www.pnud.org.br/atlas/tabelas/index.php>

[20] <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/index.html>

Anexo 1 – Resultado das Simulações

Caso 3 barras com fator de carregamento $fc = 2,5$

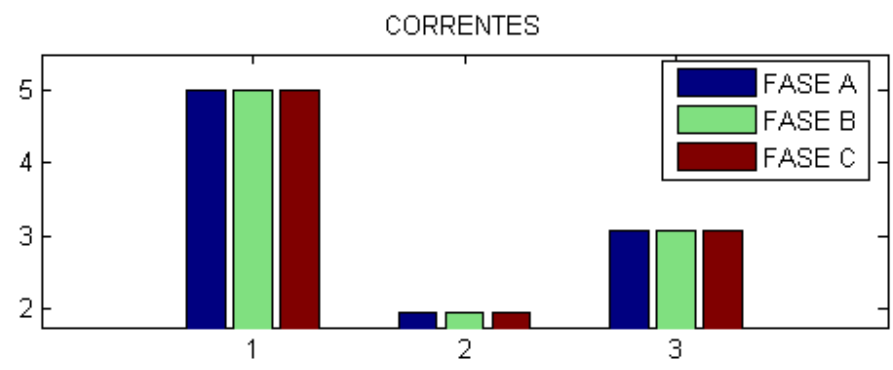
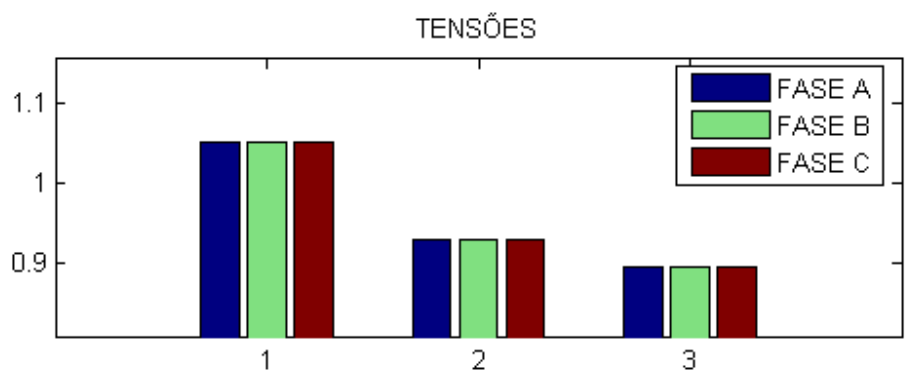
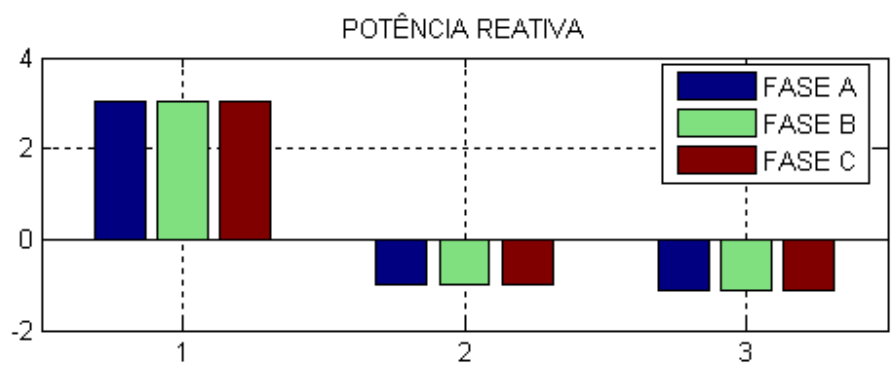
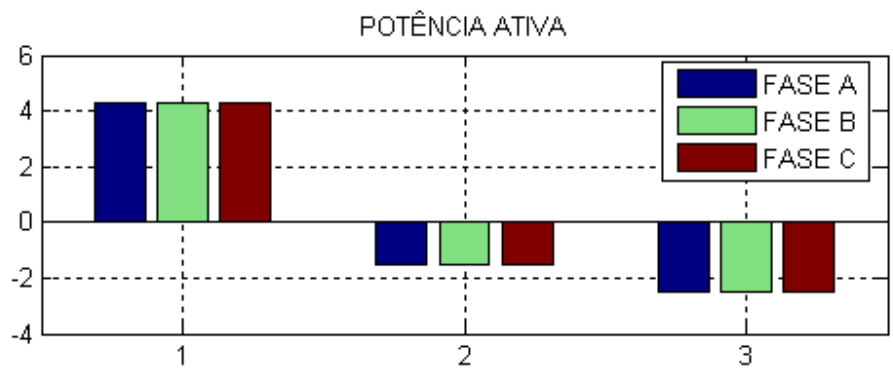
Método de Injeção de Correntes Trifásico 25-Nov-2007 12:46:43
 Sistema de 3 barras: 2 PQ, 0 PV e 1 V0.
 Simulação realizada em 1.3280 segundos em 12 iterações.

TENSÕES						
Barra	Va	FaseA	Vb	FaseB	Vc	FaseC
1.0000	1.0500	0	1.0500	-120.0000	1.0500	120.0000
2.0000	0.9277	-5.8186	0.9277	-125.8186	0.9277	114.1814
3.0000	0.8941	-8.0208	0.8941	-128.0208	0.8941	111.9792

CORRENTES						
Barra	Ia	FaseA	Ib	FaseB	Ic	FaseC
1.0000	4.9998	-35.0640	4.9998	-155.0640	4.9998	84.9360
2.0000	1.9433	140.4914	1.9433	20.4914	1.9433	-99.5086
3.0000	3.0660	147.7514	3.0660	27.7514	3.0660	-92.2486

POTÊNCIAS								
Barra	Pa	Pb	Pc	Qa	Qb	Qc	Ptotal	Qtotal
1.0000	4.2970	4.2970	4.2970	3.0159	3.0159	3.0159	12.8909	9.0478
2.0000	-1.5000	-1.5000	-1.5000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-4.5000	-3.0000
3.0000	-2.5000	-2.5000	-2.5000	-1.1250	-1.1250	-1.1250	-7.5000	-3.3750

FLUXO DE POTÊNCIA (para cada fase A, B, C)							
k	m	Pkm	Pmk	perdasP	Qkm	Qmk	perdasQ
1.0000	2.0000	4.2970	-4.0470	0.2500	3.0159	-2.2660	0.7499
1.0000	2.0000	4.2970	-4.0470	0.2500	3.0159	-2.2660	0.7499
1.0000	2.0000	4.2970	-4.0470	0.2500	3.0159	-2.2660	0.7499
2.0000	3.0000	2.5470	-2.5000	0.0470	1.2660	-1.1250	0.1410
2.0000	3.0000	2.5470	-2.5000	0.0470	1.2660	-1.1250	0.1410
2.0000	3.0000	2.5470	-2.5000	0.0470	1.2660	-1.1250	0.1410



Caso 4 barras

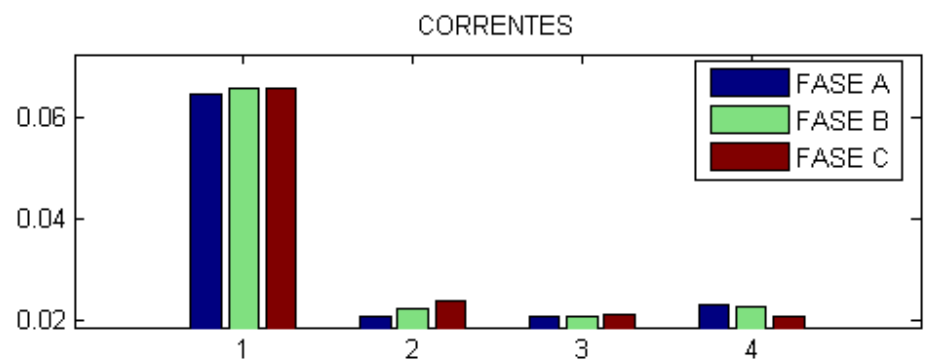
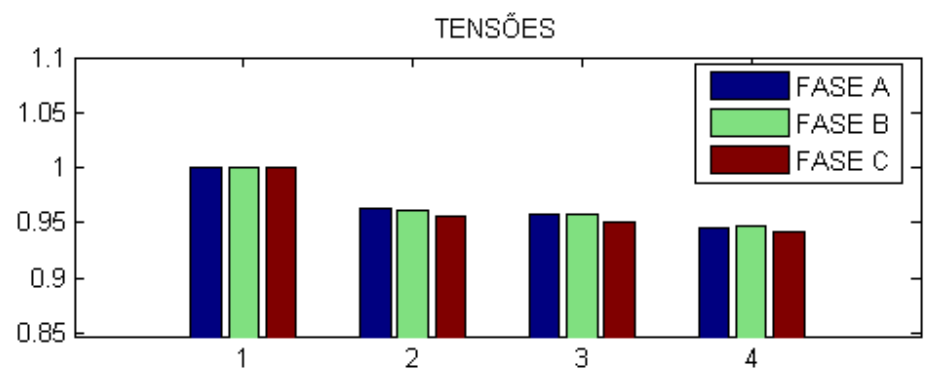
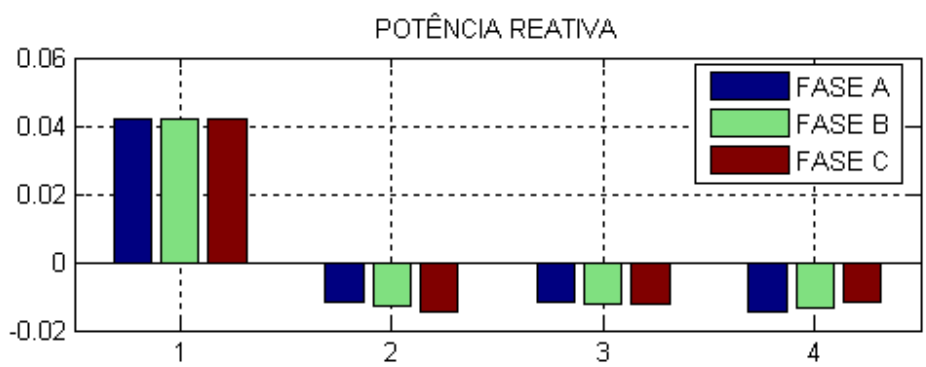
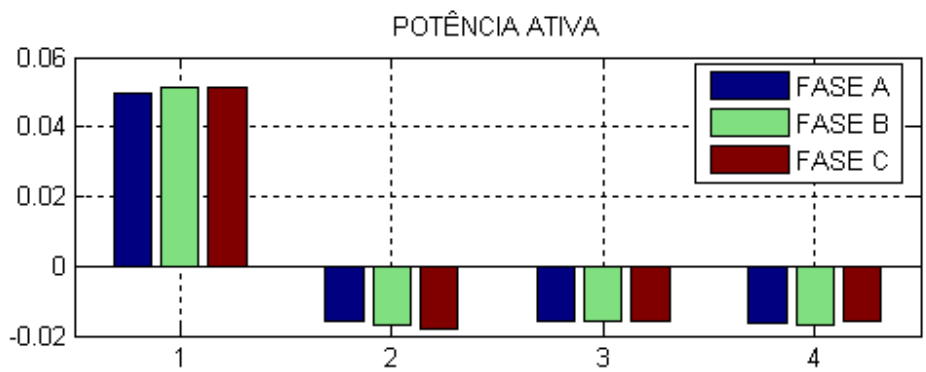
Método de Injeção de Correntes Trifásico 12-Nov-2007 22:56:59
 Sistema de 4 barras: 3 PQ, 0 PV e 1 V0.
 Simulação realizada em 2.4060 segundos em 1 iterações.

TENSÕES						
Barra	Va	FaseA	Vb	FaseB	Vc	FaseC
1.0000	1.0000	0	1.0000	120.0000	1.0000	-120.0000
2.0000	0.9627	-1.5613	0.9619	118.5676	0.9558	-121.3561
3.0000	0.9587	-1.7159	0.9579	118.4060	0.9517	-121.5134
4.0000	0.9447	-2.1443	0.9471	118.0793	0.9417	-121.7906

CORRENTES						
Barra	Ia	FaseA	Ib	FaseB	Ic	FaseC
1.0000	0.0648	-40.1170	0.0660	80.6800	0.0661	-159.1780
2.0000	0.0208	141.6821	0.0222	-98.9193	0.0240	20.0285
3.0000	0.0208	141.5515	0.0209	-98.5549	0.0211	20.7866
4.0000	0.0232	136.7744	0.0229	-100.4067	0.0210	21.7661

POTÊNCIAS								
Barra	Pa	Pb	Pc	Qa	Qb	Qc	Ptotal	Qtotal
1.0000	0.0495	0.0511	0.0513	0.0417	0.0418	0.0418	0.1518	0.1253
2.0000	-0.0160	-0.0170	-0.0179	-0.0120	-0.0130	-0.0143	-0.0509	-0.0393
3.0000	-0.0160	-0.0160	-0.0159	-0.0120	-0.0120	-0.0123	-0.0479	-0.0363
4.0000	-0.0165	-0.0170	-0.0159	-0.0144	-0.0135	-0.0117	-0.0494	-0.0396

FLUXO DE POTÊNCIA (para cada fase A, B, C)							
k	m	Pkm	Pmk	perdasP	Qkm	Qmk	perdasQ
1.0000	2.0000	0.0275	-0.0270	0.0004	0.0237	-0.0221	0.0016
1.0000	2.0000	0.0259	-0.0255	0.0004	0.0247	-0.0231	0.0016
1.0000	2.0000	0.0260	-0.0255	0.0005	0.0296	-0.0277	0.0019
2.0000	3.0000	0.0080	-0.0080	0.0000	0.0073	-0.0073	0.0001
2.0000	3.0000	0.0082	-0.0082	0.0000	0.0073	-0.0073	0.0001
2.0000	3.0000	0.0081	-0.0081	0.0000	0.0077	-0.0077	0.0001
2.0000	4.0000	0.0086	-0.0086	0.0001	0.0093	-0.0090	0.0003
2.0000	4.0000	0.0072	-0.0071	0.0000	0.0076	-0.0074	0.0002
2.0000	4.0000	0.0065	-0.0064	0.0000	0.0073	-0.0071	0.0002



Caso 4 barras com barra PV

Método de Injeção de Correntes Trifásico 18-Nov-2007 16:29:38
 Sistema de 4 barras: 2 PQ, 1 PV e 1 V0.
 Simulação realizada em 1.3430 segundos em 46 iterações.

TENSÕES

Barra	Va	FaseA	Vb	FaseB	Vc	FaseC
1.0000	1.0000	0	1.0000	-120.0000	1.0000	120.0000
2.0000	0.9845	-0.9961	0.9846	-120.9967	0.9846	119.0033
3.0000	0.9717	-1.8855	0.9718	-121.8859	0.9718	118.1141
4.0000	1.0201	1.5096	1.0202	-118.4919	1.0202	121.5082

CORRENTES

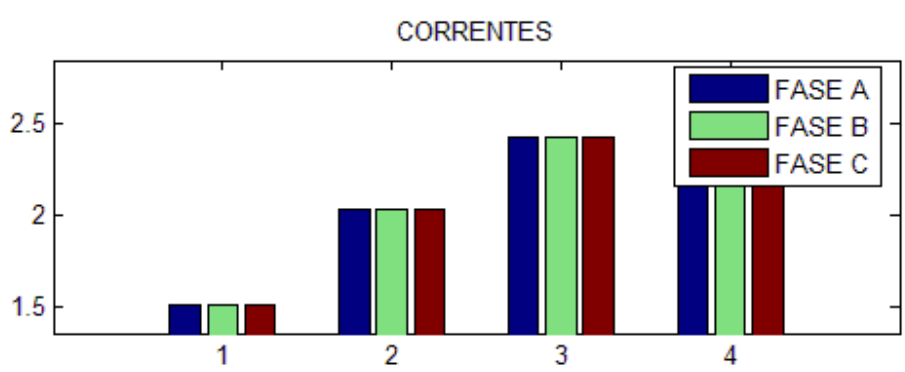
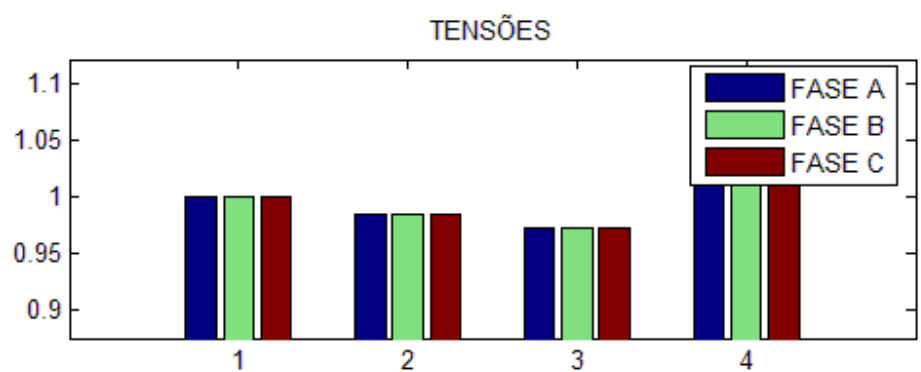
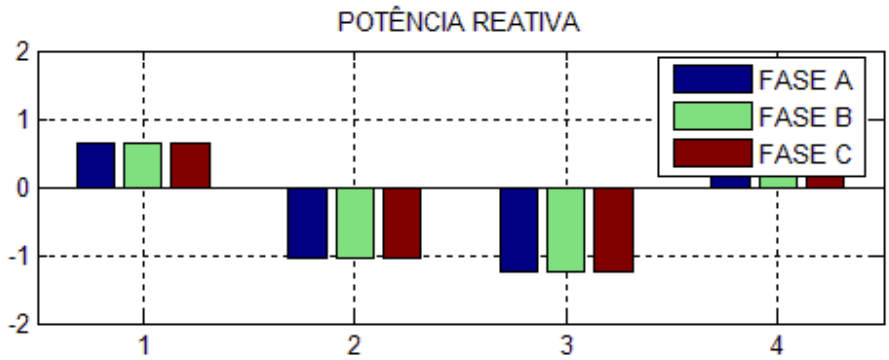
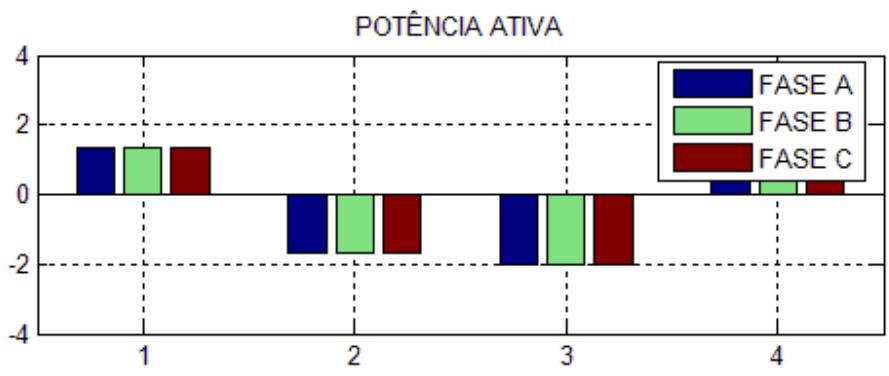
Barra	Ia	FaseA	Ib	FaseB	Ic	FaseC
1.0000	1.5064	-24.9646	1.5055	-144.8891	1.5055	95.1085
2.0000	2.0314	147.2172	2.0313	27.2165	2.0313	-92.7834
3.0000	2.4214	146.3280	2.4213	26.3276	2.4213	-93.6724
4.0000	2.5808	-23.7954	2.5815	-143.8390	2.5815	96.1623

POTÊNCIAS

Barra	Pa	Pb	Pc	Qa	Qb	Qc	Ptotal	Qtotal
1.0000	1.3657	1.3657	1.3657	0.6358	0.6336	0.6337	4.0970	1.9031
2.0000	-1.7000	-1.7000	-1.7000	-1.0535	-1.0535	-1.0535	-5.1000	-3.1605
3.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-1.2394	-1.2394	-1.2394	-6.0000	-3.7182
4.0000	2.3800	2.3800	2.3800	1.1253	1.1274	1.1273	7.1400	3.3800

FLUXO DE POTÊNCIA (para cada fase A, B, C)

k	m	Pkm	Pmk	perdasP	Qkm	Qmk	perdasQ
1.0000	2.0000	0.3861	-0.3841	0.0020	0.2326	-0.2224	0.0102
1.0000	2.0000	0.3861	-0.3841	0.0020	0.2315	-0.2212	0.0102
1.0000	2.0000	0.3861	-0.3841	0.0020	0.2315	-0.2213	0.0102
1.0000	3.0000	0.9753	-0.9658	0.0096	0.5793	-0.5315	0.0479
1.0000	3.0000	0.9753	-0.9658	0.0096	0.5783	-0.5305	0.0478
1.0000	3.0000	0.9753	-0.9658	0.0096	0.5784	-0.5305	0.0478
2.0000	4.0000	-1.3108	1.3272	0.0165	-0.6525	0.7347	0.0823
2.0000	4.0000	-1.3108	1.3272	0.0165	-0.6536	0.7359	0.0823
2.0000	4.0000	-1.3108	1.3272	0.0165	-0.6535	0.7359	0.0823
3.0000	4.0000	-1.0243	1.0419	0.0176	-0.5065	0.5944	0.0879
3.0000	4.0000	-1.0243	1.0419	0.0176	-0.5075	0.5955	0.0880
3.0000	4.0000	-1.0243	1.0419	0.0176	-0.5074	0.5954	0.0880



Caso 5 barras com TCAT

Método de Injeção de Correntes Trifásico 25-Nov-2007 03:11:16
 Sistema de 5 barras: 3 PQ, 1 PV e 1 V0.
 Simulação realizada em 1.9380 segundos em 65 iterações.

TENSÕES

Barra	Va	FaseA	Vb	FaseB	Vc	FaseC
1.0000	1.0000	0	1.0000	-120.0000	1.0000	120.0000
2.0000	0.9805	-0.9852	0.9806	-120.9858	0.9806	119.0142
3.0000	0.9681	-1.9439	0.9681	-121.9443	0.9681	118.0557
4.0000	1.0201	1.4763	1.0202	-118.5251	1.0202	121.4749
5.0000	0.9920	-1.2956	0.9920	-121.2961	0.9920	118.7040

CORRENTES

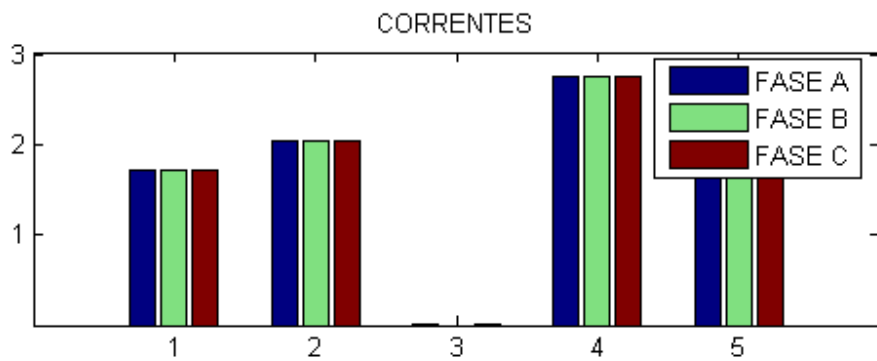
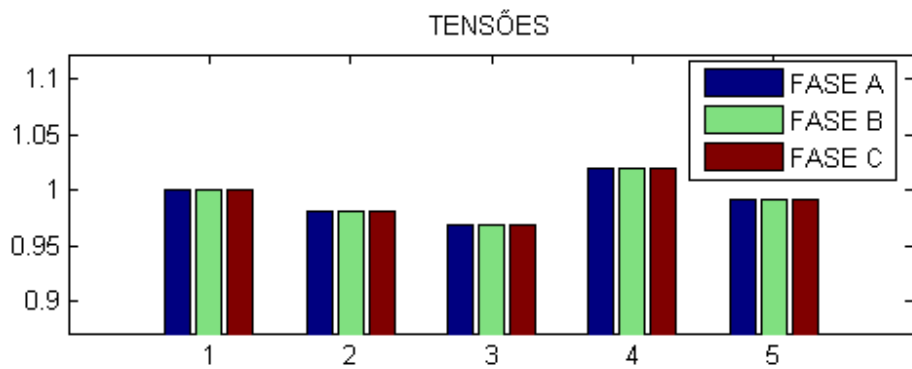
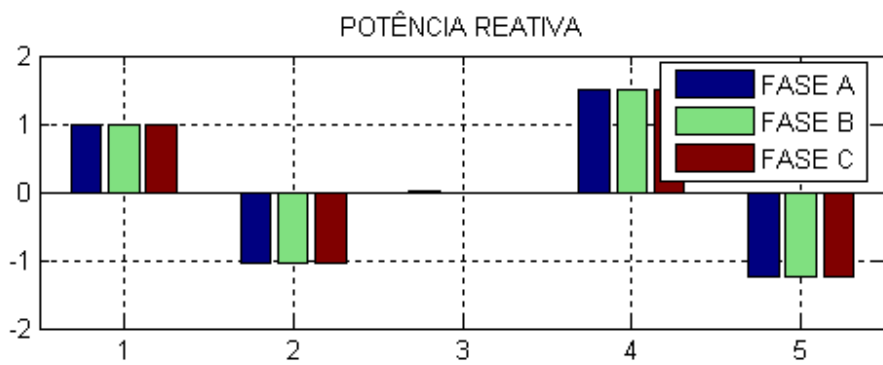
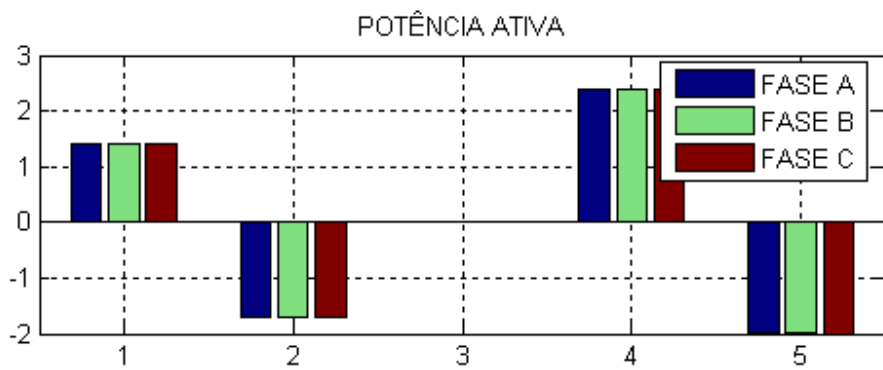
Barra	Ia	FaseA	Ib	FaseB	Ic	FaseC
1.0000	1.7196	-34.7312	1.7185	-154.6763	1.7185	85.3224
2.0000	2.0397	147.2280	2.0396	27.2274	2.0396	-92.7726
3.0000	0.0000	179.9613	0.0000	14.0362	0.0000	-60.2551
4.0000	2.7550	-30.6497	2.7559	-150.6863	2.7558	89.3146
5.0000	2.3720	146.9179	2.3719	26.9175	2.3719	-93.0825

POTÊNCIAS

Barra	Pa	Pb	Pc	Qa	Qb	Qc	Ptotal	Qtotal
1.0000	1.4132	1.4132	1.4132	0.9797	0.9777	0.9778	4.2397	2.9352
2.0000	-1.7000	-1.7000	-1.7000	-1.0535	-1.0535	-1.0535	-5.1000	-3.1605
3.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000
4.0000	2.3800	2.3800	2.3800	1.4945	1.4965	1.4965	7.1400	4.4875
5.0000	-2.0000	-2.0000	-2.0000	-1.2394	-1.2394	-1.2394	-6.0000	-3.7182

FLUXO DE POTÊNCIA (para cada fase A, B, C)

k	m	Pkm	Pmk	perdasP	Qkm	Qmk	perdasQ
1.0000	2.0000	0.3965	-0.3940	0.0026	0.3100	-0.2973	0.0128
1.0000	2.0000	0.3965	-0.3940	0.0025	0.3090	-0.2962	0.0127
1.0000	2.0000	0.3965	-0.3940	0.0025	0.3090	-0.2963	0.0127
1.0000	3.0000	1.0167	-1.0057	0.0110	0.6697	-0.6145	0.0551
1.0000	3.0000	1.0167	-1.0057	0.0110	0.6687	-0.6136	0.0551
1.0000	3.0000	1.0167	-1.0057	0.0110	0.6688	-0.6137	0.0551
2.0000	4.0000	-1.3060	1.3237	0.0176	-0.7562	0.8444	0.0881
2.0000	4.0000	-1.3060	1.3236	0.0176	-0.7573	0.8454	0.0882
2.0000	4.0000	-1.3060	1.3236	0.0176	-0.7572	0.8454	0.0882
3.0000	4.0000	-1.0375	1.0563	0.0188	-0.5561	0.6501	0.0940
3.0000	4.0000	-1.0375	1.0564	0.0188	-0.5570	0.6511	0.0941
3.0000	4.0000	-1.0375	1.0564	0.0188	-0.5570	0.6510	0.0941
3.0000	5.0000	0.5596	-0.5596	-0.0000	1.1874	-1.2231	-0.0357
3.0000	5.0000	0.5595	-0.5595	0	1.1874	-1.2231	-0.0357
3.0000	5.0000	0.5595	-0.5595	-0.0000	1.1874	-1.2231	-0.0357



Caso 13 barras

Método de Injeção de Correntes Trifásico 12-Nov-2007 23:03:15
 Sistema de 13 barras: 12 PQ, 0 PV e 1 V0.
 Simulação realizada em 1.3590 segundos em 6 iterações.

TENSÕES

Barra	Va	FaseA	Vb	FaseB	Vc	FaseC
1.0000	1.0000	0	1.0000	-120.0000	1.0000	120.0000
2.0000	0.9800	-1.8441	0.9697	-121.5444	0.9701	118.2455
3.0000	0.9800	-1.8441	0.9714	-121.5176	0.9697	118.2563
4.0000	0.9800	-1.8441	0.9763	-121.4524	0.9685	118.2923
5.0000	0.9789	-1.8672	0.9756	-121.4693	0.9676	118.2898
6.0000	0.9708	-2.1071	0.9692	-121.6402	0.9611	118.1161
7.0000	0.9735	-2.9387	0.4884	-121.4828	0.9499	117.7108
8.0000	0.9735	-2.9387	0.4884	-121.4828	0.9499	117.7108
9.0000	0.9736	-2.8862	0.9768	-121.4828	0.9497	117.7312
10.0000	0.9733	-2.8936	0.9768	-121.4846	0.9495	117.7364
11.0000	0.9708	-2.9457	0.9772	-121.5129	0.9482	117.7735
12.0000	0.9724	-3.0470	0.0000	148.5172	0.0000	27.7108
13.0000	0.9736	-2.8862	0.9768	-121.4828	0.9497	117.7312

CORRENTES

Barra	Ia	FaseA	Ib	FaseB	Ic	FaseC
1.0000	1.2869	-22.7196	1.2670	-154.1228	1.3268	86.8193
2.0000	0	0	0.2735	28.6035	0.0000	0
3.0000	0	0	0.2172	22.1556	0.0000	-90.0000
4.0000	0.0101	147.6903	0.0390	28.6161	0.0699	-91.8727
5.0000	0.0000	-1.2787	0.0000	-45.0000	0.0000	-123.6901
6.0000	0.2000	143.3843	0.1548	21.4899	0.1561	-98.7538
7.0000	0	0	0	0	0	0
8.0000	0.0000	-14.0362	0.0000	-0.0000	0.0000	-135.0000
9.0000	0.4656	147.3533	0.4930	28.7576	0.5382	-92.0693
10.0000	0.0000	-164.1288	0.0000	-32.0054	0.2395	-103.8762
11.0000	0.5366	155.6614	0.0928	17.0635	0.3789	-98.3946
12.0000	0.1586	143.0568	0.0000	90.0000	0.0000	90.0000
13.0000	0.0000	-98.6371	0.0000	34.5085	0.0000	-90.0000

POTÊNCIAS

Barra	Pa	Pb	Pc	Qa	Qb	Qc	Ptotal	Qtotal
1.0000	1.1871	1.0488	1.1104	0.4970	0.7107	0.7261	3.3463	1.9339
2.0000	0	-0.2300	-0.0000	0	-0.1320	0.0000	-0.2300	-0.1320
3.0000	0	-0.1700	-0.0000	0	-0.1250	-0.0000	-0.1700	-0.1250
4.0000	-0.0085	-0.0330	-0.0585	-0.0050	-0.0190	-0.0340	-0.1000	-0.0580
5.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
6.0000	-0.1600	-0.1200	-0.1200	-0.1100	-0.0900	-0.0900	-0.4000	-0.2900
7.0000	0	0	0	0	0	0	0	0
8.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
9.0000	-0.3935	-0.4180	-0.4435	-0.2250	-0.2390	-0.2540	-1.2550	-0.7180
10.0000	-0.0000	0.0000	-0.1700	0.0000	-0.0000	-0.1510	-0.1700	-0.1510
11.0000	-0.4850	-0.0680	-0.2900	-0.1900	-0.0600	-0.2120	-0.8430	-0.4620
12.0000	-0.1280	0.0000	0.0000	-0.0860	0.0000	-0.0000	-0.1280	-0.0860
13.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000

 FLUXO DE POTÊNCIA (para cada fase A, B, C)

k	m	Pkm	Pmk	perdasP	Qkm	Qmk	perdasQ
4.0000	3.0000	0	0	0	0	0	0
4.0000	3.0000	0.4021	-0.4003	0.0017	0.2591	-0.2573	0.0018
4.0000	3.0000	-0.0379	0.0381	0.0001	-0.1202	0.1203	0.0001
4.0000	5.0000	0.1128	-0.1127	0.0001	0.0834	-0.0832	0.0001
4.0000	5.0000	0.0762	-0.0761	0.0000	0.0532	-0.0532	0.0001
4.0000	5.0000	0.0630	-0.0629	0.0001	0.0928	-0.0927	0.0001
5.0000	6.0000	0.1609	-0.1600	0.0009	0.1116	-0.1100	0.0016
5.0000	6.0000	0.1205	-0.1200	0.0005	0.0910	-0.0900	0.0010
5.0000	6.0000	0.1205	-0.1200	0.0005	0.0910	-0.0900	0.0010
3.0000	2.0000	0	0	0	0	0	0
3.0000	2.0000	0.2303	-0.2300	0.0003	0.1323	-0.1320	0.0003
3.0000	2.0000	-0.0246	0.0246	0.0000	-0.0660	0.0660	0.0000
1.0000	4.0000	0.9017	-0.8930	0.0087	0.3113	-0.2764	0.0348
1.0000	4.0000	0.7411	-0.7342	0.0070	0.4379	-0.4091	0.0289
1.0000	4.0000	0.8955	-0.8844	0.0111	0.6067	-0.5615	0.0452
8.0000	12.0000	0.1283	-0.1280	0.0003	-0.1032	0.1033	0.0001
8.0000	12.0000	0	0	0	0	0	0
8.0000	12.0000	0	0	0	0	0	0
4.0000	9.0000	0.7857	-0.7808	0.0049	0.0203	-0.0060	0.0143
4.0000	9.0000	0.0144	-0.0144	0.0000	-0.0238	0.0239	0.0000
4.0000	9.0000	0.5983	-0.5925	0.0058	0.6082	-0.5907	0.0176
9.0000	8.0000	0.1129	-0.1128	0.0001	-0.0843	0.0844	0.0001
9.0000	8.0000	0	0	0	0	0	0
9.0000	8.0000	0.0205	-0.0205	0.0000	-0.0527	0.0527	0.0000
9.0000	13.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
9.0000	13.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
9.0000	13.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
9.0000	10.0000	0.5593	-0.5592	0.0001	0.0334	-0.0333	0.0001
9.0000	10.0000	-0.1035	0.1035	0.0000	-0.1228	0.1228	0.0000
9.0000	10.0000	0.3222	-0.3221	0.0001	0.3693	-0.3692	0.0001
8.0000	7.0000	0	0	0	0	0	0
8.0000	7.0000	0	0	0	0	0	0
8.0000	7.0000	0	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
10.0000	11.0000	0.5151	-0.5139	0.0013	0.0912	-0.0905	0.0007
10.0000	11.0000	-0.0198	0.0198	0.0001	-0.1178	0.1178	0.0000
10.0000	11.0000	0.1521	-0.1518	0.0003	0.2183	-0.2181	0.0002

