



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

MARY KARLLA SILVA ARAÚJO

Relatório apresentado à coordenação de estágios em Engenharia Elétrica da UFPB como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Campina Grande - PB 19 de Fevereiro de 1998



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

ESTAGIÁRIA: MARY KARLLA SILVA ARAÚJO

MATRÍCULA: 9421032-1

**EMPRESA: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (LSP)**

TIPO DE ESTÁGIO: SUPERVISIONADO

PERÍODO DE ESTÁGIO: 14 DE OUTUBRO DE 1997 A 30 DE JANEIRO DE 1998

PROFESSOR ORIENTADOR: ELIANE MARISE RAPOSO DE CARVALHO

COORDENADOR DE ESTÁGIOS: RICARDO J. AGUIAR LOUREIRO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à DEUS pela oportunidade que me foi dada e por ter conseguido concluir mais esta etapa de minha vida.

A minha família pelo apoio e compreensão nos momentos de desânimo e aborrecimentos.

Agradeço à Professora Eliane Marise R. de Carvalho pelo auxílio e orientação na execução desse relatório e pelos conhecimentos técnicos fornecidos nas disciplinas POTÊNCIA I e II.

Pôr fim, agradecimentos muito especiais aos amigos e colegas de curso, que tornaram mais brandas as dificuldades encontradas durante todo esse tempo, principalmente à Geraldo, Valter e a Damásio pela força.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 O Laboratório de Sistemas de Potência (LSP).....	2
CAPÍTULO 2	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Fluxo de Carga.....	3
2.3 Equações Básicas de Análise de Fluxo de Carga.....	4
2.3.1 Aspectos Computacionais do Problema do Fluxo De Carga	6
CAPÍTULO 3	7
3.1 Introdução	7
3.2 Matriz Admitância de Barra (Z_{barra})	7
3.2.1 Elaboração da Matriz Z_{barra}	8
3.2.2 Redução de Kron.....	8
CAPÍTULO 4	10
4.1 Introdução	10
4.2 Equacionamento.....	10
CAPÍTULO 5	12
5.1 Introdução	12
5.2 Equacionamento:	12
5.2.1 Método de Newton-Raphson: Coordenadas Cartesianas.....	13
CAPÍTULO 6	15
6.1 Introdução:	15
FIGURAS	16

6.1 Fluxograma do Programa para Obtenção de Z_{barra}	16
6.2 Fluxograma para o Método de Gauss-Seidel	18
6.3 Fluxograma para o Método de Newton-Raphson	20
6.4 Sistema de Potência para Simulação	22
CAPÍTULO 7	23
Conclusão.....	23
BIBLIOGRAFIA	24
ANEXOS	25

OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo apresentar o relatório de estágio da aluna **MARY KARLLA SILVA ARAÚJO**, realizado no Departamento de Engenharia Elétrica - **DEE**, no período compreendido entre 14 de Outubro de 1997 a 30 de Janeiro de 1998, sob a orientação da professora Eliane Marise Raposo de Carvalho. O relatório trata basicamente da Obtenção do Fluxo de Carga em Sistemas de Potência, apresentando uma breve teoria, sobre os métodos utilizados para isto, complementada com os resultados das simulações de Sistemas de Potência que podem ser considerados exemplos clássicos.

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

1.1 INTRODUÇÃO

O Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPB, é a unidade de ensino, pesquisa e extensão em Engenharia Elétrica no CCT/UFPB. Entre outras competências previstas regimentalmente, o DEE objetiva:

- ⇒ Propiciar as condições necessárias à ministração de um ensino de boa qualidade nos níveis de Graduação e de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, ao lado das respectivas Coordenações e Órgãos Colegiados;
- ⇒ Buscar e prover os meios ao seu alcance para o florescimento e desenvolvimento de atividades de pesquisa em Engenharia Elétrica;
- ⇒ Promover e estimular a prestação de serviços à comunidade no campo da Engenharia Elétrica em forma de extensão, de acordo com os objetivos da universidade.

Áreas de atuação :

O DEE exerce atividades de ensino, pesquisa e extensão.

No campo do Ensino da Engenharia Elétrica, o DEE dedica-se à formação e treinamento de profissionais de nível superior em Engenharia Elétrica, nas opções Eletrotécnica e Eletrônica.

As atividades de ensino e pesquisa desenvolvidas no DEE, a nível de pós-graduação, são agrupadas em duas grandes áreas de conhecimento:

Processamento da Energia - abrangendo Alta Tensão, Eletrônica de Potência, Máquinas Elétricas, Planejamento Energético e Sistemas de Potência.

Processamento da Informação - abrangendo Comunicações, Redes de Computadores e Microeletrônica, Automação e Processamento Digital de Sinais, Instrumentação e Controle, e Microondas e Eletromagnetismo Aplicados.

No âmbito da Extensão, o DEE desenvolve atividades de prestação de serviços à comunidade, sob a forma de cursos, de consultoria, de assistência técnica e de atividades especiais de extensão.

O DEE conta com 9 Laboratórios de Pesquisa, 5 Laboratórios de Ensino de Graduação, e 1 Laboratório de Pesquisa de Pós-Graduação (COPELE) onde são desenvolvidas atividades de ensino, pesquisa e extensão. Dando suporte a estas atividades, o DEE conta com:

1. LEMCAD - Lab. de Ensaio, Manutenção, Calibração, Aferição e Desenvolvimento
2. Oficina Mecânica
3. Setor de Desenho

1.2 O LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (LSP)

O Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) do DEE foi criado em 1986, com a instalação de um minicomputador VAX-750, doado pelo Governo Alemão, tendo como finalidade básica o desenvolvimento de atividades de ensino, pesquisa e extensão, com ênfase no estudo e desenvolvimento de métodos para simulação de Sistemas Elétricos de Potência.

Atualmente as atividades desenvolvidas no LSP são realizadas utilizando microcomputadores adquiridos através de convênios com a ELETROBRÁS e empresas do setor elétrico. O LSP vem sendo utilizado para apoio a atividade de ensino na graduação e para desenvolvimento de dissertações de mestrado e teses de doutorado.

No LSP também são desenvolvidas atividades de extensão, como cursos para empresas, desenvolvimento de métodos, programas computacionais e atividades de consultoria para empresas do setor elétrico. A coordenadora do Laboratório de Sistemas de Potência é a professora Eliane Marise Raposo de Carvalho.

CAPÍTULO 2

FLUXO DE CARGA

2.1 INTRODUÇÃO

Um sistema de potência é uma das ferramentas utilizadas para conversão e transporte de energia. Um sistema elétrico de potência é particularmente vantajoso quando a fonte primária é hidráulica. Essa energia deve ser transformada no próprio local em que se encontra e um sistema elétrico de potência propicia a sua utilização em pontos distantes. A energia hidráulica é convertida em elétrica na própria origem, sendo então transportada por linhas de transmissão até o ponto em que é convertida na forma desejada, luz, calor, energia mecânica ou química. A linha de transmissão não pode armazenar energia e toda a energia fornecida na estação geradora é convertida simultaneamente em carga, exceto as perdas do sistema.

Um sistema elétrico de potência consiste em três componentes principais: as estações geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. Um sistema de potência bem projetado compreende um grande número de estações geradoras interligadas de modo que a energia total produzida possa ser utilizada em toda a região coberta pelo sistema.

2.2 FLUXO DE CARGA

Todo sistema de potência deve ser planejado de forma a atender seus usuários com elevada continuidade de serviço, respeitando ainda diversos critérios de qualidade nesse atendimento. Esses critérios (de regime permanente) referem-se a valores máximo e mínimo de tensão nos pontos de entrega, excursão máxima de frequência em torno do valor nominal, carregamento máximo dos componentes do sistema, etc.

Os estudos de fluxo de carga desempenham um papel muito importante, pois permitem verificar, admitida uma projeção da carga ao longo do tempo, se o sistema proposto será capaz de manter-se dentro dos critérios estabelecidos no atendimento aos usuários. Permitem ainda a comparação de alternativas de expansão, bem como a avaliação do impacto no sistema da entrada de novas unidades geradoras.

Além do setor de planejamento, os estudos de fluxo de carga são largamente utilizados para operação de sistemas. Nesse último caso, a maneira como o sistema irá evoluir até atingir uma certa configuração já está definida, e os estudos de fluxo de potência visam, com informações mais confiáveis a respeito da carga, definir o melhor perfil de tensões para operação do sistema bem como os ajustes de *taps* dos transformadores, condições para o chaveamento de bancos de capacitores etc.

Na operação de sistemas elétricos modernos, os estudos de fluxo de carga são realizados praticamente *on line* pelo computador, recebendo os dados das telemedições comandados por um sistema supervisivo. Quer em planejamento ou operação, os estudos de fluxo de potência são realizados para simular o sistema funcionando em regime permanente, seja em condições normal ou de emergência.

Entende-se como condição normal aquela em que o sistema apresenta todos os componentes em serviço, carregados de acordo com o despacho de geração/carga

estabelecido (despacho nominal). Estudos de fluxo de potência para condição normal são feitos para verificar se nessa situação os critérios estabelecidos são respeitados tanto na situação de carga máxima quanto de carga mínima.

Os critérios para condição normal, em geral, dizem respeito à:

- ⇒ Valores máximos e mínimos de tensão permitidos para todas as barras do sistema.
- ⇒ Carregamentos máximos permitidos para as Linhas de Transmissão e Transformadores.
- ⇒ Fator de potência mínimo das unidades geradoras, que se reduz em um limite de potência reativa para essas máquinas.
- ⇒ Limites de potência reativa para os compensadores síncronos.

O fluxo de carga em condições de emergência é realizado de forma a verificar a viabilidade de o sistema continuar operando, mesmo com a perda temporária de algum equipamento ou Linha de Transmissão, dentro de critérios estabelecidos para as condições de emergência.

2.3 EQUAÇÕES BÁSICAS DE ANÁLISE DE FLUXO DE CARGA

Para obtermos a solução de qualquer rede elétrica em regime permanente é necessário resolver um sistema de equações algébricas não-lineares, que corresponde à solução simultânea de $2(n-1)$ equações onde n é o número de barras da rede. Há casos em que dependendo da metodologia utilizada na formulação das equações de fluxo de carga poderemos recair em um sistema com menor número de equações.

As equações são algébricas e não diferenciais porque estamos interessados em obter a solução do sistema operando em regime permanente senoidal. Por isso também representamos cada componente por seu modelo estático. As equações são não-lineares e não podemos, utilizar na sua solução os processos diretos de análise nodal, usuais na teoria de circuitos.

Desta forma são necessários, conforme veremos nas seções adiante processos iterativos de cálculo numérico para solucionar o problema. A não linearidade das equações utilizadas ocorre devido a certas características da modelagem de alguns componentes do sistema.

Assim, uma barra geradora tem uma característica muito mais de potência ativa constante do que de uma força eletromotriz constante em módulo e fase, conforme exigiriam as técnicas de circuitos. Além disso as cargas (em sua maioria) comportam-se como elementos que absorvem potência ativa e reativa constante nas faixas habituais de tensão operativa, diferindo de um elemento dito de impedância constante onde as potências ativa e reativa seriam proporcionais ao quadrado da tensão.

Como num sistema de potência a carga é dada pela potência consumida e não pela corrente, a potência aparente em função da tensão pode ser escrita como:

$$S = VI^* \tag{2.1}$$

$$P - jQ = V^* I \tag{2.2}$$

Para uma rede elétrica é válida a relação

$$[I] = [Y_B] [V] \tag{2.3}$$

Onde: $[I]$ = vetor coluna das correntes injetadas nas barras
 $[V]$ = vetor coluna das tensões nas barras
 $[Y_B]$ = matriz admitância de barra

Escrevendo a 2.3 para linha i , vem:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n \quad (2.4)$$

De 2.2 e 2.4 resulta:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \quad (2.5)$$

Essa é a primeira das equações fundamentais da análise do fluxo de carga e nela a convenção para P_i e Q_i é de valores positivos quando forem potências injetadas na barra, e negativos quando forem potências absorvidas.

Vale lembrar mais uma vez que o problema do fluxo de carga consiste em resolver o sistema de equações (2.5) para variáveis de interesse em cada barra.

É usual na Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência definir-se três tipos de barra em função da dupla de variáveis que são fixadas:

⇒ Barra de Referência (tipo 3): Esta barra, é única no sistema, pois nesta barra deve-se produzir a potência para suprir a carga e o déficit originado das perdas. Portanto vemos que a aplicação da equação (2.5) para este tipo de barra deve ser feita para determinar P e Q conhecendo-se previamente $|V|$ e δ .

⇒ Barra de Carga (tipo 0): Nesta barra a tensão é determinada em módulo e fase, conhecendo-se previamente a potência instalada. A aplicação da equação (2.5) deve ser feita para determinar $|V|$ e δ conhecendo-se P e Q , a potência (carga) consumida na barra.

⇒ Barra de Tensão Controlada (tipo 1): Às vezes, a tensão em uma determinada barra está fora da faixa de tensão em que os equipamentos instalados na barra funcionam adequadamente. Necessita-se, portanto, de especificar a faixa de tensão em que a operação é adequada a estabelecer o módulo de "V" que se deseja de modo a se poder determinar a quantidade de potência reativa que se deve produzir localmente para manter o módulo da tensão no valor desejado. Para este tipo de barra aplica-se a equação (2.5) para determinar Q e δ que sejam compatíveis com $|V|$ e P .

2.3.1 Aspectos Computacionais do Problema do Fluxo de Carga

Na seção anterior foi apresentada uma formulação geral do problema do fluxo de carga para o sistema de potência com n barras. No entanto, não foi resolvida nenhuma equação de fluxo de carga. Enumerando as exigências necessárias que devem ser atendidas por quaisquer técnicas de cálculo que venha a ser utilizada:

- ⇒ Elas devem permitir o manejo de equações algébricas não lineares.
- ⇒ Elas devem permitir o manejo de sistemas tendo, talvez, centenas de barras.
- ⇒ Elas não devem ser limitadas a sistemas sem perdas.
- ⇒ Elas devem ser suficientemente precisas.
- ⇒ Elas não devem consumir muito tempo, posto que podemos desejar, numa situação prática, realizar muitas séries de cálculos para várias combinações de especificações de potência e tensão de barra, a fim de obter o melhor fluxo possível.
- ⇒ As n equações de fluxo de carga, são equações complexas.

Torna-se logo óbvio que, para atender a todas essas exigências, devemos procurar métodos computacionais, que nos permitam um grande número de simulações com boa velocidade na apresentação dos resultados.

CAPÍTULO 3

FORTRAN – FERRAMENTA PARA RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE FLUXO DE CARGA

3.1 INTRODUÇÃO

Já se tem comentado amplamente o impacto que os computadores exerceram sobre a ciência, a tecnologia, a administração e outros ramos da atividade humana. O seu desenvolvimento vertiginoso ocorreu após a Segunda Guerra Mundial e hoje o computador encontra aplicação desde a tradicional folha de pagamento até o controle de foguetes espaciais. Enfim os computadores estão sendo utilizados em todas as áreas do conhecimento, estando cada uma delas utilizando os sistemas de programação que melhor se adequem às suas necessidades.

No ramo da engenharia, em particular, na análise dos Sistemas de Potência muitos cálculos dispendiosos são necessários, para isso a existência de uma linguagem de programação, que permitisse uma maior interatividade entre homem-máquina tornou-se de vital importância. A linguagem FORTRAN permite isto realizando cálculos de grande complexidade, com comandos, relativamente, simples.

FORTRAN (FORmula TRANslation) é uma linguagem de programação semelhante à linguagem matemática, que atribui significados específicos a palavras e símbolos. Foi a primeira linguagem de alto nível, criada em 1956. FORTRAN 90 é uma das versões mais recentes, mantendo, no entanto, quase todas as características das versões anteriores.

3.2 MATRIZ ADMITÂNCIA DE BARRA (Z_{BARRA})

Como foram realizados estudos visando conhecer um pouco da linguagem FORTRAN, era necessária a análise de um programa para que alguns dos conceitos novos fossem fixados. Portanto, para isso foi utilizado o programa para obtenção da matriz Z_{BARRA} devido a sua grande utilidade na realização de cálculos de defeitos em Sistemas de Potência.

Em Sistemas de Potência a análise nodal, é a mais conveniente em regime permanente ou transitório.

Com base na análise nodal, se tem duas alternativas para representar a rede elétrica:

⇒ Através da matriz admitância de barra (Y_{BARRA})

⇒ Através da matriz impedância de barra (Z_{BARRA})

Com o objetivo da determinação da corrente de defeito em sistemas de potência, a matriz Z_{BARRA} é de fundamental importância, motivo pelo qual será apresentada sua formação.

A construção de Z_{BARRA} é feita adicionando-se barras e ligações até se chegar a real configuração do sistema. A partir da ordenação dos ramos (linhas ou transformadores), se determina a sequência de implementação que obedece a três tipos de ligação:

- ⇒ Ramo entre referência e uma nova barra
- ⇒ Ramo entre uma barra existente e uma nova barra
- ⇒ Ramo entre duas barras existentes

3.2.1 Elaboração da Matriz Z_{BARRA}

Neste subitem serão mostradas as equações utilizadas para cada tipo de inserção de ramo, posteriormente, no fluxograma do programa para obtenção da matriz Z_{BARRA} serão mencionadas essas equações tornando-se mais clara a sua aplicação.

1. Adição de um ramo entre a referência e uma nova barra (p):

⇒ Para esta condição todos os elementos da matriz permanecem inalterados, exceto os elementos correspondentes a linha (p) da matriz, que terá como elemento diagonal o valor da impedância inserida entre a referência e a nova barra (Z_b)

2. Adição de Z_b a partir de uma nova barra “p” até uma barra existente “k”:

⇒ Neste caso a matriz obtida da condição 1, será agora utilizada só que acrescentando-se uma nova linha de valor:

$$\left[Z_{k1} Z_{k2} \dots Z_{kn} Z_{KK} + Z_b \right]$$

3. Adição de Z_b entre duas existentes “j” e “k” (linha de fechamento de laço):

⇒ Para esta inserção de ramo a nova linha da matriz correspondente aos elementos não-diagonais é formada com os elementos da linha “j” menos os elementos da linha “k”. A nova coluna é a transposta da linha. Elemento diagonal:

$$Z_{bb} = Z_{jj} + Z_{kk} - 2Z_{jk} + Z_b$$

⇒ A matriz Z_{barras} terá que ser reduzida, pois nenhuma fonte de tensão foi adicionada.

3.2.2 Redução de Kron

Quando há um fechamento de laço, a matriz Z_{barras} deverá ser reduzida. A matriz é particionada de tal maneira que os elementos identificados somente com os nós a serem eliminados estejam separados dos outros elementos por linhas horizontais e verticais.

As equações encontram-se na próxima página.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V' \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I' \\ I_b \end{bmatrix}$$

$$[V'] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_1 = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} Z_{13} \\ Z_{23} \end{bmatrix}$$

$$Z_3 = [Z_{31} \ Z_{32}]$$

$$I' = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Nas equações acima, Z_1 são as impedâncias próprias e mútuas dos elementos a serem mantidos. Z_2 , Z_3 e Z_4 são as impedâncias mútuas de barras retiradas e barra a ser eliminada.

Manipulando-se com as equações matriciais acima, a matriz Z_{BARRA} de ordem reduzida é dada pela equação:

$$Z' = Z_1 - Z_2 Z_4^{-1} Z_3$$

CAPÍTULO 4

MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL

4.1 INTRODUÇÃO

As equações do fluxo de carga podem ser resolvidas através de uma grande quantidade de métodos numéricos de resolução de equações. Dois destes métodos, o de Gauss-Seidel e o de Newton-Raphson, serão examinados aqui por serem os mais eficientes para este tipo de problema.

4.2 EQUACIONAMENTO

Vários problemas de análise de redes de energia elétrica envolvem a resolução de sistemas algébricos lineares de grandes dimensões com matrizes de coeficientes altamente esparsas (por exemplo, matrizes com 99% de elementos nulos). Além da matriz admitância nodal Y , pode-se citar exemplos de outras matrizes que aparecem em programas de fluxo de carga e que apresentam estruturas semelhantes à da matriz Y , como é o caso da matriz Jacobiana do método de Newton.

O método de Gauss-Seidel, é um método de aproximações sucessivas que expressa cada variável como função dela própria e das demais variáveis e para determinação do valor de uma variável X_i em um determinado passo K são utilizados os valores já calculados neste passo. Isto é, para um passo K qualquer temos:

Para esse caso a variável X_i é a tensão em cada barra V_i . Deste modo para aplicar o

$$X_i^K = f(X_1^K, X_2^K, \dots, X_{i-1}^K, X_i^{K-1}, X_{i+1}^{K-1}, \dots, X_n^{K-1})$$

método de Gauss-Seidel para barras de carga do sistema podemos escrever a equação (2.5) da seguinte forma:

Onde $\{PQ\}$ é o conjunto das barras de carga.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \right) \quad i \in \{PQ\} \quad (4.1)$$

Aplicando a equação acima para um sistema qualquer com “n” barras tomando a barra 1 como a de referência e uma aproximação inicial ($V_2^0, V_3^0, \dots, V_n^0$) teremos o passo 1. O processo se repete até que se obtenha a precisão desejada tendo-e então (V_i) em módulo e fase com a precisão tal que a lei de Kirchoff seja satisfeita em todas as barras de carga.

A experiência com métodos iterativos de solução de problemas de fluxo de carga mostra ser necessário um número excessivo de iterações antes que as correções de tensão estejam dentro da precisão desejada, se a tensão corrigida em uma carga substitui simplesmente o melhor valor anterior à medida que avançam os cálculos de barra a barra. O número de iterações necessárias é reduzido consideravelmente se a correção na tensão de cada barra for multiplicada por uma constante que aumente o valor daquela correção, para levar o valor da tensão mais próximo do valor a que está convergindo. Os fatores de multiplicação que melhoram a convergência são chamados *fatores de aceleração*. A

diferença entre o novo valor calculado da tensão e o melhor valor anterior da tensão na barra é multiplicada pelo fator apropriado, a fim de obter uma melhor correção a ser adicionada ao valor anterior. Para um sistema qualquer existem valores ótimos para os fatores de aceleração e uma escolha mal feita desses fatores pode ocasionar uma convergência mais lenta, ou mesmo tornar impossível tal convergência. Normalmente, o fator 1,6 é uma boa escolha tanto para a componente real como para a imaginária.

CAPÍTULO 5

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

5.1 INTRODUÇÃO

Com o aumento de conexões em Extra Alta Tensão que reflete a evolução dos sistemas modernos, o número de barras a serem representadas em um estudo de fluxo de carga cresce vertiginosamente. O método de Gauss-Seidel passa então a encontrar sérias dificuldades de convergência, pois um ajuste em uma tensão de uma certa barra durante uma iteração reflete-se de imediato apenas para as barras vizinhas requerendo várias iterações para propagar-se ao longo do sistema.

São registrados casos em estudos de operação em o método falha não encontrando solução para os dados de um sistema que se encontra operando normalmente.

Uma outra restrição séria do método de Gauss-Seidel é a sua dificuldade em tratar com impedâncias negativas que se tornaram comuns devido ao difundido uso compensação série em sistemas de Extra Alta Tensão. A presença de impedâncias negativas no sistema pode resultar em uma admitância própria muito pequena em alguma(s) barra(s), tornando de difícil convergência o processo iterativo ver equação (4.1).

Na pesquisa por novos métodos, aquele que se mostrou mais adequado e que é o empregado pela maioria dos programas existentes, é o método que será analisado nesse capítulo.

5.2 EQUACIONAMENTO:

Aplicação às equações de fluxo de carga:

O sistema de equações que necessitamos resolver se resume em:

$$\begin{aligned}
 P_1 - jQ_1 &= V_1^* \sum_{j=1}^n Y_{1j} V_j \\
 P_2 - jQ_2 &= V_2^* \sum_{j=1}^n Y_{2j} V_j \\
 &\vdots \\
 P_n - jQ_n &= V_n^* \sum_{j=1}^n Y_{nj} V_j
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

A literatura a respeito do assunto registra que os algoritmos escritos em termos do método de Newton-Raphson em coordenadas cartesianas tem se mostrado mais eficientes.

Por outro lado, o desenvolvimento das equações em coordenadas polares da origem a métodos (chamados de desacoplados) e que são muito úteis na Análise de Contingências. Mas, só será tratado neste texto o método de Newton-Raphson em coordenadas cartesianas.

5.2.1 Método de Newton-Raphson: coordenadas cartesianas

Uma equação genérica do sistema de equações (5.1) pode ser escrita em coordenadas cartesianas colocando :

$$\begin{aligned} V_i &= e_i + jf_i \\ Y_{ij} &= G_{ij} + jB_{ij} \end{aligned}$$

Como:

$$P_i - jQ_i = (e_i + jf_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij} + jB_{ij}) (e_j + jf_j) \quad (5.2)$$

Separando as partes real e imaginária, resulta:

$$\begin{aligned} P_i &= \sum e_j (G_{ij} e_j - f_j B_{ij}) + f_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \\ Q_i &= \sum f_j (G_{ij} e_j - f_j B_{ij}) - e_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Delatando-se a r-ésima equação (r é a barra oscilante), renumerando-se as barras restantes de 1 a (n-1), desconsiderando ainda a presença de barras tipo 2 (geração), pode-se escrever o sistema de equações (já na forma apropriada ao algoritmo de Newton-Raphson), na forma compacta:

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

As derivadas parciais necessárias para o cálculo da matriz Jacobiana são calculadas como se segue:

- Submatriz [J₁]
- Elementos de fora da diagonal:

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_j} = (e_i G_{ij} + f_i B_{ij}) (j \neq i) \quad (5.5)$$

- Elementos da diagonal:

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_i} = 2e_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}} (G_{ij} e_j - f_j B_{ij}) \quad (5.6)$$

- Submatriz [J₂]
- Elementos de fora da diagonal:

$$\frac{\delta P_i}{\delta f_j} = (-e_i B_{ij} + f_i G_{ij}) (j \neq i) \quad (5.7)$$

- Elementos da diagonal:

$$\frac{\delta Q_i}{\delta e_j} = (f_i G_{ij} - e_i B_{ij}) (j \neq i) \quad (5.8)$$

- Submatriz [J₃]

- Elementos de fora da diagonal:

$$\frac{\delta P_i}{\delta f_i} = 2f_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (G_{ij} f_j + e_j B_{ij}) \quad (5.9)$$

- Elementos da diagonal:

$$\frac{\delta Q_i}{\delta e_i} = -2e_i B_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (e_j B_{ij} + f_j G_{ij}) \quad (5.10)$$

- Submatriz [J₄]:

- Elementos de fora da diagonal:

$$\frac{\delta Q_i}{\delta f_j} = -(f_j B_{ij} + e_i G_{ij}) (j \neq i) \quad (5.11)$$

- Elementos da diagonal:

$$\frac{\delta Q_i}{\delta f_i} = -2f_i B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) \quad (5.12)$$

O processo de cálculo resume-se em:

Numa dada iteração K, calcula-se inicialmente a matriz jacobiana utilizando os valores de e_i e f_i disponíveis da iteração (K-1). Com o vetor $[D]^{k-1}$ já calculado e os valores de $\Delta P_i^{(K-1)}$ e $\Delta Q_i^{(K-1)}$ da iteração anterior, resolve-se o sistema linear da Equação (5.13) e redefinem-se os valores de e_i e f_i através da relação (5.14).

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J_1] & [J_2] \\ [J_3] & [J_4] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} e_i^K &= e_i^{(K-1)} + \Delta e_i^{(K-1)} \\ f_i^K &= f_i^{(K-1)} + \Delta f_i^{(K-1)} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Calcula-se, então, o vetor $[D]^k$ com os novos valores de e_i e f_i , e se as suas coordenadas forem inferiores a uma dada tolerância, admite-se a convergência do processo, caso contrário deve-se iniciar uma nova iteração.

Os resultados que se encontram em anexo (ANEXO C) foram obtidos a partir de um programa, que faz uso das equações anteriores.

CAPÍTULO 6

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

6.1 INTRODUÇÃO:

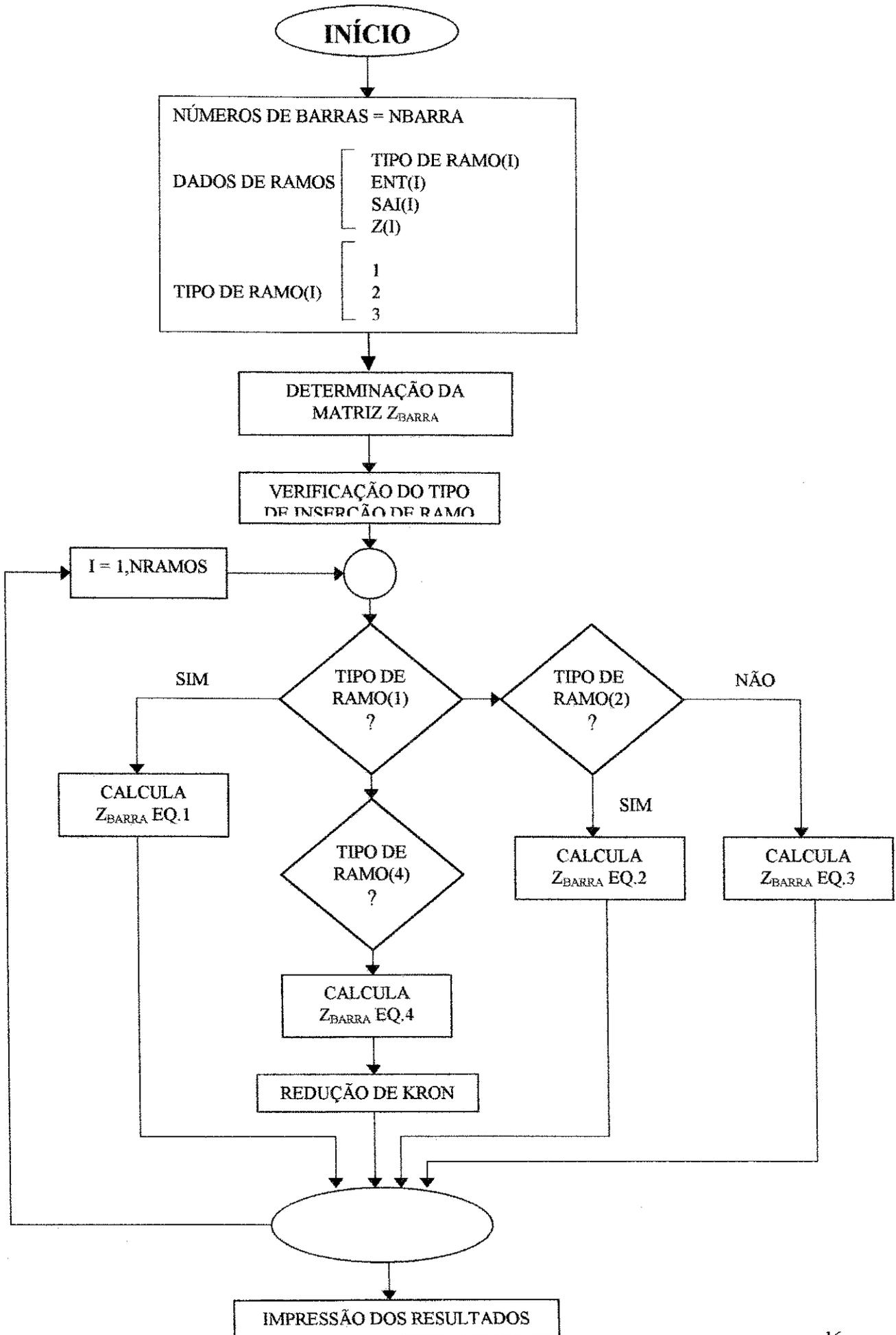
Durante a realização do estágio, o que se pretendeu fazer foi uma pequena introdução a linguagem FORTRAN. Pois, o conhecimento básico sobre FORTRAN permitiria a análise dos programas que se encontram em anexo e a realização de algumas modificações nas suas estruturas.

A principal atividade desenvolvida durante o estágio foram as modificações nos programas disponíveis, e a simulação dos fluxos de carga de Sistemas de Potência que já haviam sido estudados na teoria, possibilitando comprovar a veracidade dos resultados. O estudo dos programas para os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson são de uma utilidade tanto prática como já foi dito anteriormente, como didática, pois os alunos das disciplinas Análise de Sistemas de Potência I e II, poderão fazer uso desses programas para realização de simulações dos sistemas estudados em sala de aula.

6.1 FLUXOGRAMA DO PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DE ZBARRA

Os resultados que se encontram no (ANEXO A), foram obtidos do programa que é representado pelo fluxograma abaixo.

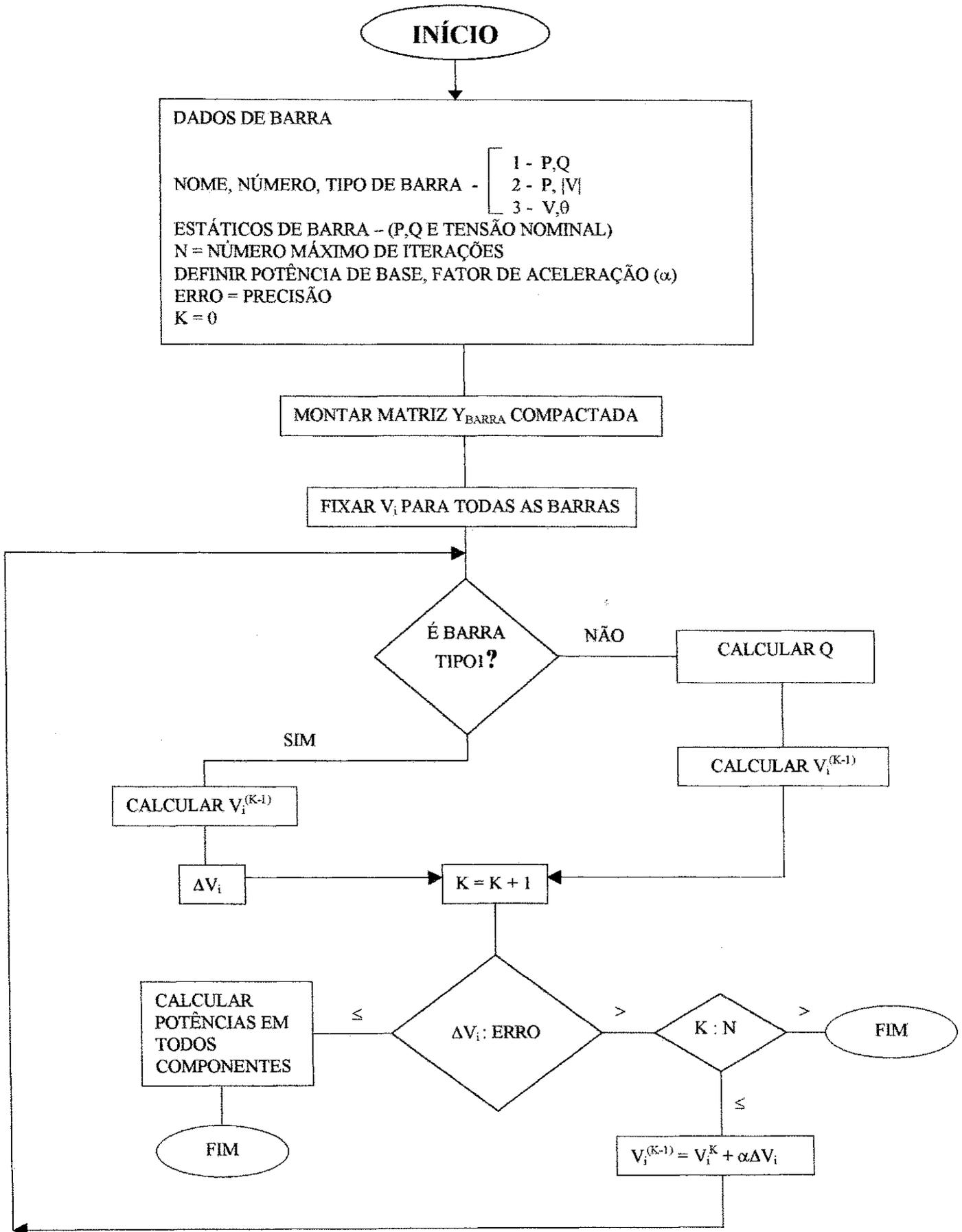
FLUXOGRAMA – DO PROGRAMA Z_{BARRA}



6.2 FLUXOGRAMA PARA O MÉTODO DE GAUSS

Foram realizadas várias modificações em um programa já existente para obtenção do Fluxo de Carga pelo método de Gauss-Seidel, pois este programa encontrava-se escrito em FORTRAN 77 e a versão que estamos utilizando é do FORTRAN 90. O fluxograma abaixo representa as atividades realizadas pelo programa e os resultados obtidos se encontram no (ANEXO B).

FLUXOGRAMA – MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL

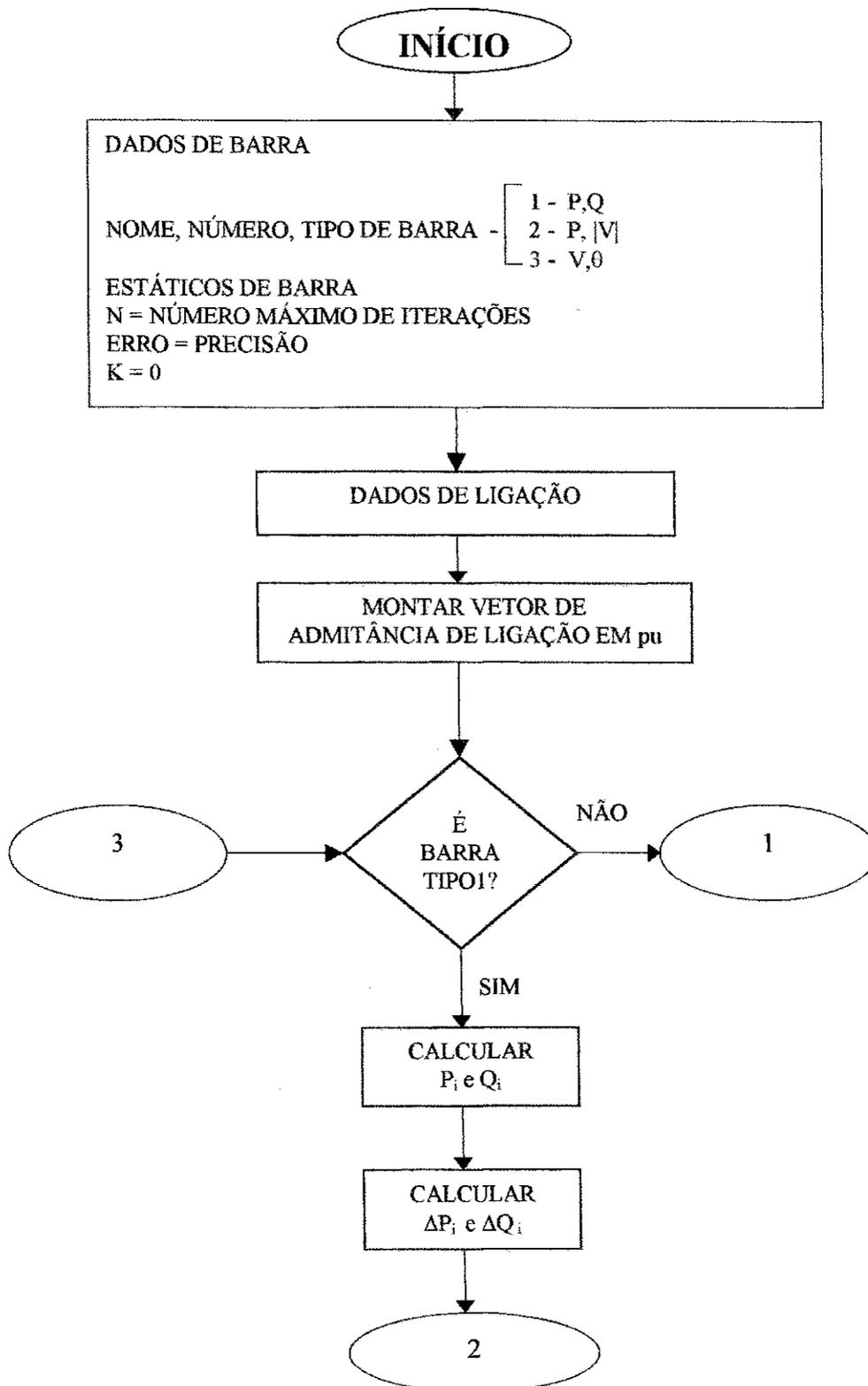


6.3 FLUXOGRAMA PARA O MÉTODO DE NEWTON

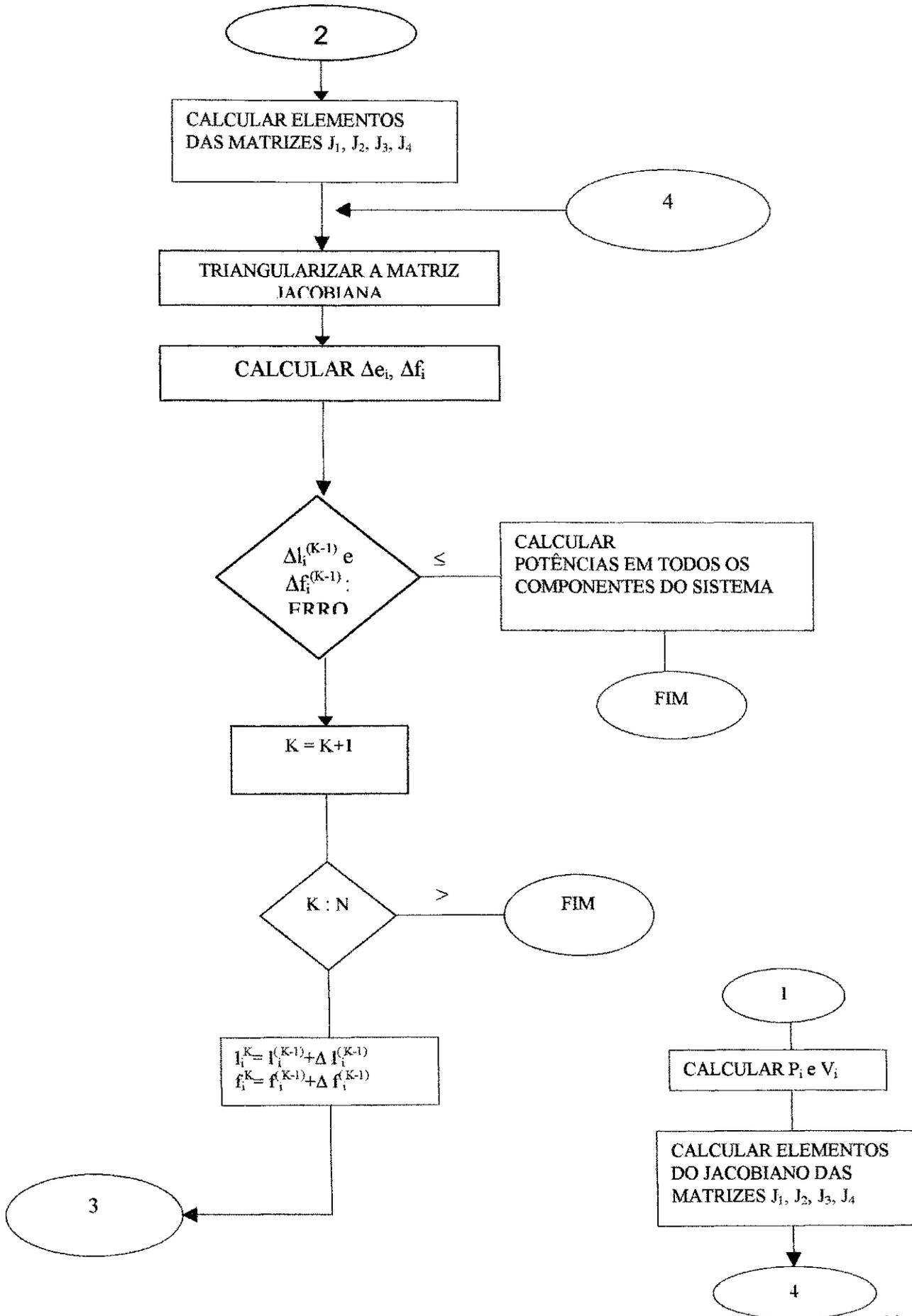
Terminada a análise do método de Gauss-Seidel, partiu-se para o de Newton-Raphson, permitindo que comparações fossem feitas entre os dois métodos e conclusões de qual dos dois proporcionava o melhor resultado.

O fluxograma abaixo representa as atividades realizadas pelo programa e os resultados obtidos se encontram no (ANEXO C).

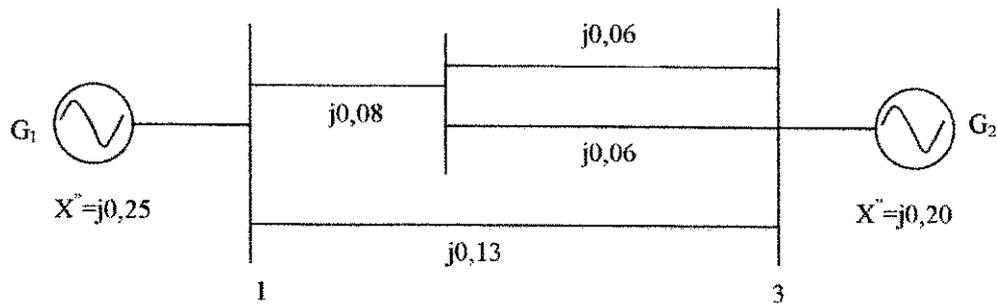
FLUXOGRAMA – MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON



FLUXOGRAMA (CONTINUAÇÃO) - NEWTON-RAPHSON



6.4 SISTEMA DE POTÊNCIA PARA SIMULAÇÃO



Os resultados que se encontram no (ANEXO A) referem-se ao sistema acima.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Durante o estudo do fluxo de carga, ficou bastante claro sua importância, quando se deseja projetar ou ampliar um sistema de potência, além de podermos determinar as condições de operação do sistema.

Um dos inconvenientes encontrados no estudo do fluxo de carga é que as equações são não lineares, isso significa grandes dificuldades na obtenção de soluções analíticas. No entanto, com toda disponibilidade de ferramentas matemáticas, encontradas nos software desenvolvidos para o ramo das ciências exatas, tornou-se simples encontrarmos soluções numéricas para essas equações.

As equações do fluxo de carga podem ser resolvidas por uma grande quantidade de métodos. Os métodos mais utilizados são o de Newton-Raphson e o de Gauss-Seidel por serem os mais eficientes para esse tipo de problema.

Atualmente, o método de Newton-Raphson está sendo o mais utilizado, já que o de Gauss-Seidel passa a encontrar sérias dificuldades de convergência, com o crescimento do número de barras dos sistemas de potência.

Apesar do pouco tempo de estágio, a experiência foi válida, pois nos possibilitou conhecer um pouco mais sobre a importância do estudo de fluxo de carga e como ele pode influenciar o comportamento do sistema de potência (projeto, ampliação, funcionamento sob condições ótimas).

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Carvalho, Eliane M. R.** – Apostila: Fluxo de Carga.
- [2] **Carvalho, Eliane M. R.** – Apostila: Falta Trifásicas Simétricas
- [3] **Elgerd, O. I. .** – Introdução à teoria de Sistemas de Energia Elétrica. Editora McGraw-Hill do Brasil São Paulo, 1976.
- [4] **Monticelli, Alcir J.** – Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1983.
- [5] **Ramos, D. S. e Dias, E. M. .** –Sistemas Elétricos de Potência Regime Permanente, Volume 2. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro ,1983.
- [6] **Stevenson, W. D.** Elementos de Análise de Sistemas de Potência. Editora McGraw-Hill do Brasil São Paulo, 1978.

ANEXOS

ANEXO A

6
 1 0 1 .25000
 3 1 2 .08000
 1 0 3 .20000
 2 1 3 .13000
 2 2 3 .06000
 2 2 3 .06000

MATRIZ IMPEDÂNCIA DE BARRA DO SISTEMA

.12735 .10609 .09812
 .10609 .13448 .11513
 .09812 .11513 .12150

Ocorrência de falta na barra 1

Corrente de falta 7.85233 pu

Potência de curto-circuito 785.23270 MVAcc

barra	tensão
1	.00000
2	.16693
3	.22953

Contribuição de corrente das linhas adjacentes

0	1	4.00000
1	2	2.08668
1	3	1.76565

Ocorrência de falta na barra 2

Corrente de falta 7.43601 pu

Potência de curto-circuito 743.60060 MVAcc

barra	tensão
1	.21110
2	.00000
3	.14392

Contribuição de corrente das linhas adjacentes

1	2	2.63878
2	3	2.39861
2	3	2.39861

Ocorrência de falta na barra 3

Corrente de falta 8.23015 pu

Potência de curto-circuito 823.01480 MVAcc

barra	tensão
1	.19246
2	.05249
3	.00000

Contribuição de corrente das linhas adjacentes

0	3	5.00000
1	3	1.48048
2	3	.87483
2	3	.87483

ANEXO B

TENSOES NAS BARRAS :

BARRA	VMOD	VANG
2	1.04500	-4.95898
3	1.01000	-12.64673
4	1.02390	-10.33673
5	1.03139	-8.93258
6	1.07000	-14.87742
7	1.04385	-13.42891
8	1.09000	-13.42891
9	1.02672	-15.05054
10	1.02679	-15.30182
11	1.04456	-15.20384
12	1.05295	-15.71727
13	1.04610	-15.73385
14	1.01685	-16.38232

NUMERO DE ITERACOES = 3

ANEXO C

ESTUDO DE FLUXO DE CARGAS, PELO MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL

DADOS GERAIS

NÚMERO DE BARRAS.....= 14
 NÚMERO MÁXIMO DE ITERAÇÕES.....= 100
 TOLERÂNCIA PARA CONVERGÊNCIA.....= .0001
 ACELERADOR DA COMPONENTE DA TENSÃO.....= 1.6000
 ACELERADOR DA COMPONENTE IMAGINÁRIA DA TENSÃO= 1.6000
 NÚMERO DE RAMOS.....= 20
 BASE DE POTÊNCIA.....= 100

DADOS DE LINHA

NL	LINHA	R	X	Y	TAP	LADO
1	1 2	.0194	.0592	.0	.0264 1.0000	.0000 1
2	2 3	.0470	.1980	.0	.0219 1.0000	.0000 2
3	2 4	.0581	.1763	.0	.0187 1.0000	.0000 2
4	1 5	.0540	.2230	.0	.0246 1.0000	.0000 1
5	2 5	.0569	.1739	.0	.0170 1.0000	.0000 2
6	3 4	.0670	.1710	.0	.0173 1.0000	.0000 3
7	4 5	.0133	.0421	.0	.0064 1.0000	.0000 4
8	5 6	.0000	.2520	.0	.0000 .9320	.0000 5
9	4 7	.0000	.2091	.0	.0000 .9780	.0000 4
10	7 8	.0000	.1761	.0	.0000 1.0000	.0000 7
11	4 9	.0000	.5562	.0	.0000 .9690	.0000 4
12	7 9	.0000	.1100	.0	.0000 1.0000	.0000 7
13	910	.0318	.0845	.0	.0000 1.0000	.0000 9
14	611	.0950	.1989	.0	.0000 1.0000	.0000 6
15	612	.1229	.2558	.0	.0000 1.0000	.0000 6
16	613	.0662	.1303	.0	.0000 1.0000	.0000 6
17	914	.1271	.2704	.0	.0000 1.0000	.0000 9
18	1011	.0821	.1921	.0	.0000 1.0000	.0000 10
19	1213	.2209	.1999	.0	.0000 1.0000	.0000 12
20	1314	.1709	.3480	.0	.0000 1.0000	.0000 13

1

DADOS DE BARRA

BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
1	3	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0600	.0000
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	1.0000	52.3260
2	1	40.0000	.0000	21.7000	12.7000	1.0450	-4.9800
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	50.0000	-40.0000	1.0000	65.4210
3	1	.0000	.0000	94.2000	19.0000	1.0100	-12.7200

BARRA	TIPO	PG	BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	40.0000	.0000	2.0000	51.7410
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
4	0	.0000	.0000	47.8000	3.9000	1.0190	-10.3300
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	1.0000	63.5240
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
5	0	.0000	.0000	7.6000	1.6000	1.0200	-8.7800
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	3.0000	25.5170
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
6	1	.0000	.0000	11.2000	7.5000	1.0700	-14.2200
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	24.0000	-6.0000	1.0000	49.9170
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
7	0	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0620	-13.3700
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	2.0000	42.5760
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
8	1	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0900	-13.3600
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	24.0000	-6.0000	2.0000	76.3230
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
9	0	.0000	.0000	29.5000	16.6000	1.0560	-14.9400
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	1.0000	91.3540
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
10	0	.0000	.0000	9.0000	5.8000	1.0510	-15.1000
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	1.0000	34.8870
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
11	0	.0000	.0000	3.5000	1.8000	1.0570	-14.7900
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	1.0000	54.6960
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
12	0	.0000	.0000	6.1000	1.6000	1.0550	-18.0700
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	2.0000	45.7340
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
13	0	.0000	.0000	13.5000	5.8000	1.0500	-15.1600
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	2.0000	76.3470
BARRA	TIPO	PG	QG	PC	QC	V	ANG
14	0	.0000	.0000	14.9000	5.0000	1.0360	-16.0400
			BS	QMAX	QMIN	CMAX	YNOM
			.0000	.0000	.0000	1.0000	94.7420

NUMERO DE ITERAÇÕES:

TENSSAO E FASE EM CADA BARRA

BARRA	VREAL	VIMAG	VMOD	ANG
1	1.0600	.0000	1.0600	.0000
2	1.0411	-.0907	1.0450	-4.9800
3	.9852	-.2224	1.0100	212.7200

4	-.6015	.1096	.6114	-10.3300
5	-.6048	.0934	.6120	-8.7800
6	1.0372	-.2628	1.0700	-14.2200
7	-.6199	.1473	.6372	-13.3700
8	1.0605	-.2519	1.0900	-13.3600
9	-.6122	.1633	.6336	-14.9400
10	-.6088	.1643	.6306	-15.1000
11	-.6132	.1619	.6342	-14.7900
12	-.6018	.1963	.6330	-18.0700
13	-.6081	.1648	.6300	-15.1600
14	-.5974	.1718	.6216	-16.0400

FLUXOS DE POTÊNCIA

LINHA	POTENCIA ATIVA MWATT	POTENCIA REATIVA MVAR
1 1 2	156.8048	-20.3860
1 2 1	-152.5116	27.6447
2 2 3	73.2150	3.5624
2 3 2	-70.8932	1.5941
3 2 4	260.8965	892.0980
3 4 2	200.7553	505.9258
4 1 5	139.1066	754.7497
4 5 1	146.1319	419.0512
5 2 5	272.3098	903.9856
5 5 2	194.2850	518.1304
6 3 4	338.1723	822.9254
6 4 3	183.7151	506.6792
7 4 5	-21.9974	6.1887
7 5 4	22.1850	-6.0760
8 5 6	-24.6334	407.2830
8 6 5	24.6334	712.9556
9 4 7	9.8799	-7.2809
9 7 4	-9.8799	8.1235
10 7 8	.0688	624.7925
10 8 7	-.0688	1068.7760
11 4 9	5.5980	-2.2151
11 9 4	-5.5980	2.7543
12 7 9	10.0550	2.2229
12 9 7	-10.0550	-1.9356
13 910	1.8988	1.5365
1310 9	-1.8941	-1.5239
14 611	353.7279	747.8580
1411 6	214.0574	441.1555
15 612	263.3865	585.1816
1512 6	178.7095	334.9434
16 613	556.9179	1113.4630
1613 6	338.6160	650.1228
17 914	3.3833	1.2484
1714 9	-3.3421	-1.1608
181011	-1.3786	-.5900
181110	1.3832	.6008
191213	-3.9586	5.5826
191312	4.2168	-5.3490
201314	1.9993	.5519
201413	-1.9807	-.5142

GERAÇÃO E COMPENSAÇÃO

BARRA	PG	QG	YG	NBANCOS
1	-10.5803	-36.4724	.0000	.0000
2	40.0000	-18.4465	.0000	.0000
3	.0000	11.9220	.0000	.0000
6	.0000	10.3496	.0000	.0000
8	.0000	14.6306	.0000	.0000

PERDAS ATIVAS

3647.9180

BALANÇO DE REATIVOS
