

Sebastián de Jesús Manrique Machado

Relatório técnico da implementação de um software para o cálculo do fluxo de potência

Londrina-Paraná, Brasil

Outubro de 2014

Sebastián de Jesús Manrique Machado

Relatório técnico da implementação de um software para o cálculo do fluxo de potência

Desenvolvimento de um software computacional *open source* para a solução do fluxo de potência usando MATLAB ®

Universidade Estadual de Londrina

Centro de Tecnologia e Urbanismo

Programa de Pós-Graduação - Mestrado em Engenharia Elétrica

Londrina-Paraná, Brasil

Outubro de 2014

Agradecimentos

O autor agradece à CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

A solução do fluxo de potência é um problema clássico na engenharia elétrica o qual consiste na determinação da magnitude e ângulo das tensões nas barras do sistema e o fluxo de potência ativa e reativa a través das linhas e transformadores do sistema para determinado cenário de geração. Neste relatório, é apresentado o desenvolvimento de um software que faz o cálculo do fluxo de potência de um sistema descrito por médio de um arquivo de MS Excel que tem os parâmetros das linhas, barras, cargas e geradores ordenados de acordo com um padrão preestabelecido. Primeiro é apresentada a teoria e o desenvolvimento matemático do problema junto com as diferentes técnicas de solução. Logo, é feito um resumo do algoritmo que foi programado e do jeito como o usuário deve interatuar com o software a través dos arquivos de entrada e saída. Posteriormente são apresentados os resultados e a discussão dos testes que foram feitos. Finalmente são apresentadas algumas ideias sobre o trabalho futuro que pode acrescentar a utilidade do software. *Copyright ©2014 Sebastián de Jesus Manrique Machado* ¹.

Palavras-chaves: Fluxo de potência, métodos de solução do fluxo de potência, comparação métodos de fluxo de potência, software.

¹ Creative Commons 4.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>>

Lista de ilustrações

Figura 1 – Circuito <i>pi</i> equivalente de uma linha de transmissão	19
Figura 2 – Ilustração do proceso iterativo do método de <i>Newton-Raphson</i>	22
Figura 3 – Ilustração do proceso iterativo do método desacoplado alternado	24
Figura 4 – Fluxograma geral do software	28
Figura 5 – Exemplo do arquivo de entrada do sistema de 4 barras em <i>MS EXCEL</i> ®	29
Figura 6 – Exemplo do arquivo de texto da saída para o sistema de 4 barras	30
Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema de 4 barras	31
Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema IEEE de 14 barras	34
Figura 9 – Comparação do número de iterações para conseguir a convergência de cada método para diferentes sistemas	36
Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema de 5 barras	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos de barras para a solução do fluxo de potência	21
Tabela 2 – Dados das linhas de transmissão do sistema de 4 barras (GRAINGER; STEVENSON, 1994)	31
Tabela 3 – Dados de geração e carga nas 4 barras do sistema de potência em (GRAINGER; STEVENSON, 1994)	32
Tabela 4 – Resultado do fluxo de potência a través das linhas do sistema de 4 barras considerando uma tolerância de 0.0005	32
Tabela 5 – Resultado do fluxo de potência para o sistema de 4 barras considerando uma tolerância de 0.0005	32
Tabela 6 – Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 14 barras	33
Tabela 7 – Dados de geração e carga nas barras do sistema IEEE de 14 barras . .	33
Tabela 8 – Resultado do fluxo de potência a través das linhas do sistema IEEE de 14 barras considerando uma tolerância de 0.0005	35
Tabela 9 – Resultado do fluxo de potência para o sistema IEEE de 14 barras considerando uma tolerância de 0.0005	35
Tabela 10 – Resultado do fluxo de potência CC para as linhas do sistema IEEE de 14 barras	37
Tabela 11 – Resultado do fluxo de potência CC para o sistema IEEE de 14 barras .	37
Tabela 12 – Análise de erro relativo para os resultados associados as linhas do sistema IEEE de 14 barras	38
Tabela 13 – Análise de erro relativo para os resultados associados as barras do sistema IEEE de 14 barras	39
Tabela 14 – Dados de geração e carga nas barras do sistema de 5 barras	49
Tabela 15 – Dados das barras de transmissão do sistema de 5 barras	50

Lista de abreviaturas e siglas

PQ	Barra de tipo Carga
PV	Barra de tipo Tensão controlada

Lista de símbolos

B'	Matriz formada pela parte imaginaria da matriz Y_{barras} de igual dimensão que a submatriz H
B''	Matriz formada pela parte imaginaria da matriz Y_{barras} sem considerar a resistência e de igual dimensão que a submatriz L
B_{km}	Parte Imaginária do elemento Y_{km} ou condutância
G_{km}	Parte Real do elemento Y_{km} ou susceptância
H	Submatriz da matriz Jacobiana que representa as derivadas parciais da potência ativa respeito ao ângulo θ
J	Matriz Jacobiana
L	Submatriz da matriz Jacobiana que representa as derivadas parciais da potência reativa respeito à tensão V
M	Submatriz da matriz Jacobiana que representa as derivadas parciais da potência reativa respeito ao ângulo θ
N	Submatriz da matriz Jacobiana que representa as derivadas parciais da potência ativa respeito à tensão V
P_k	Potência ativa líquida na barra k
Q_k	Potência reativa líquida na barra k
θ_k	Ângulo do fasor de tensão da barra k respeito à barra slack
θ_{km}	Diferencia entre θ_k e θ_m
V_k	Magnitude da tensão da barra k
Y_{barras}	Matriz de Admitância
Y_{km}	Elemento de la fila k e luna m da matriz de admitância

Sumário

	Introdução	17
1	DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA	19
1.1	Modelamento dos elementos do sistema de potência	19
1.1.1	Linhas de Transmissão	19
1.1.2	Transformadores	19
1.1.3	Potência líquida de uma barra	20
1.2	O problema do Fluxo de Potência	20
1.3	Método de Newton-Raphson	22
1.4	Método desacoplado simultâneo	23
1.5	Método desacoplado alternado	24
1.6	Método desacoplado rápido	25
1.7	Método fluxo DC ou linearizado	25
1.7.1	Representação das perdas	26
2	SOFTWARE	27
2.1	Algoritmo e fluxograma do software	27
2.2	Arquivos de entrada e de saída	29
3	TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
3.1	Sistema 4 Barras do livro de Stevenson	31
3.2	Sistema IEEE de 14 barras	32
3.3	Comparação entre os métodos	34
3.4	Resultados do fluxo DC e análise de erro	36
4	TRABALHO FUTURO	41
	Referências	45
	ANEXOS	47
	ANEXO A – SISTEMA DE 5 BARRAS	49
	ANEXO B – CÓDIGO FONTE E EXEMPLOS	51

Formulário de Identificação	53
--	-----------

Introdução

A energia elétrica em geral, é gerada a través da conversão da energia potencial da água, contida em represas, em energia mecânica rotacional que finalmente é convertida em energia elétrica por médio do gerador síncrono. Como pode-se reparar, é um processo que precisa de varias características especias que normalmente apresentam-se longe das cidades e dos centros de consumo da energia elétrica. Assim, precisa-se de um sistema de transmissão para transportar a energia até as cidades. Devido a aspectos relacionados com a confiabilidade, com as dificuldades e custos para armazenar a energia, precisa-se de interligar as diferentes usinas geradoras e os diferentes centros de carga, tarefa que de novo corresponde à transmissão, e desse jeito vão se-formando os sistemas de potência.

O sistema de potência deve ser planejado e operado com muito cuidado. Estas atividades precisam e fazem uso de fluxo de potência como uma ferramenta fundamental para desenvolver todas as análises que são feitas nas diferentes fases do planejamento e da operação do sistema. Alguns exemplos são as análises dos diferentes cenários de demanda em um dia típico, análises de contingencias, avaliação de perdas de energia, nível de carga dos ativos do sistema de potência, avaliação de manutenção nos diferentes ativos de potência, análise de estabilidade de tensão ([AJJARAPU; CHRISTY, 1992](#)) e estabilidade de ângulo do rotor, etc.

A solução do fluxo de potência permite avaliar as tensões nas barras, correntes, potência aparente e potência ativa pelas linhas e perdas no sistema de potência. Porém, primeiro é necessário fazer um modelamento correto e apropriado dos diferentes elementos do sistema de potência.

Assim, pode-se observar a importância das análises do fluxo de potência dentro das análises dos sistemas de potência. Neste caso é apresentada uma ferramenta computacional *open source* e com licenciamento *GNU (General Public License V3)* baseada em *MATLAB*® para o cálculo do fluxo de potência. Atualmente, já existem varias ferramentas computacionais baseadas neste linguagem para o mesmo propósito tais como *PSAT* ([MILANO, 2005](#)), *Matpower*, ou o software apresentado em ([SRIKANTH et al., 2013](#)).

1 Desenvolvimento matemático do problema do Fluxo de Potência

1.1 Modelamento dos elementos do sistema de potência

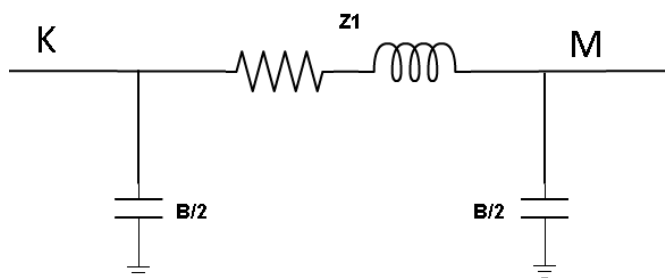
Para o tratamento do problema do fluxo de potência, os valores em por unidade são muito mais práticos e oferecem uma série de vantagens na hora de fazer os cálculos computacionais. Neste relatório não é explicado o sistema em por unidade, em caso de precisar esclarecer alguma dúvida é aconselhado ler (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Também, é importante conhecer que os modelos que vão ser apresentados consideram o sistema de potência em regime permanente, balanceado, a baixas frequências (50 Hz - 60 Hz) e tensões e correntes senoidais puras.

1.1.1 Linhas de Transmissão

Para o problema do fluxo de potência, as linhas de transmissão podem ser modeladas com modelos de parâmetros concentrados o qual significa que mesmo que a impedância série e a impedância shunt estão distribuídas em todo o comprimento da linha, neste caso pode-se modelar com parâmetros concentrados e não distribuídos. Normalmente, as linhas são modeladas a través do circuito *pi* equivalente o qual é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Circuito *pi* equivalente de uma linha de transmissão



O valor Z_1 em p.u. são obtidos de acordo com a equação (1.1) onde Z_{km1} é a impedância de sequência positiva por unidade de comprimento e D é a distância que percorre a linha. De forma análoga pode-se obter B_1 .

$$Z_1 = \frac{Z_{km1}D}{Z_{base}} \quad (1.1)$$

1.1.2 Transformadores

Nos sistemas em p.u. os transformadores geram uma situação particular que é uma das maiores vantagens de trabalhar neste sistema. O efeito do transformador é que

gera tensões base diferentes no primário e no secundário e por tanto as impedâncias base também serão diferentes. Assim, no sistema em *p.u.* pode-se demonstrar que o transformador pode-se representar como uma reatância (GRAINGER; STEVENSON, 1994), já que a impedância em *p.u.* de primário para secundário é igual à impedância de secundário para primário.

1.1.3 Potência líquida de uma barra

Para aplicar um método numérico na solução do fluxo de potência, precisa-se de uma expressão geral da potência líquida em uma barra. É conveniente então, achar primeiro a potência a través de uma linha de transmissão.

De acordo com a Figura 1, pode-se escrever que a corrente da linha é

$$I_{km} = \frac{1}{Z_{km}}(E_k - E_m) + j\frac{B_k^{sh}}{2} = Y_{km}(E_k - E_m) + j\frac{B_k^{sh}}{2}, \quad (1.2)$$

porém, a tensão nas barras K e M , é um fasor com magnitudes V_k e V_m e ângulos θ_k e θ_m , e além disso sabe-se que $S = VI^*$, então a equação (1.2) pode-se rescrever como (1.3)

$$I_{km} = Y_{km}(V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{j\theta_m}) + j\frac{B_k^{sh}}{2}. \quad (1.3)$$

Desenvolvendo a equação (1.3), obtendo a matriz de admitâncias do sistema (Y_{barras}), expandindo a análise para uma barra com varias linhas de transmissão e aplicando que $S = VI^*$ podem ser obtidas as expressões (1.4) e (1.5).

$$P_k == V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}), \quad (1.4)$$

$$Q_k == V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}). \quad (1.5)$$

1.2 O problema do Fluxo de Potência

O problema do fluxo de potência deve ser corretamente acotado para poder conseguir aplicar uma técnica de solução de equações não lineares. Desse jeito, o fluxo de potência precisa que algumas de suas variáveis sejam dados de entrada. Para o problema do fluxo de potência o problema é encarado assim :

- As cargas em cada barra devem ser conhecidas. Na prática os operadores fazem estatísticas do comportamento normal da demanda e planejam a operação de um dia supondo uma demanda constante durante um período de tempo, normalmente de uma hora.

- A geração das unidades do sistema deve ser conhecida, e deve-se deixar a geração de uma planta livre para o processo de solução (Barra Slack). Esta atividade é feita durante o despacho econômico que faz cada operador baseado na oferta apresentada pelas plantas geradoras e a restrições do sistema.
- Em condições normais de operação os ângulos θ não são muito altos e as tensões nas barras tendem a 1 p.u, por tanto normalmente a solução que é proposta para a primeira iteração e de uma tensão de 1 p.u. com ângulo de zero. Nas barras de tensão controlada pode-se modificar a magnitude da tensão.

Baseados em tais suposições, podem-se distinguir 3 tipos de barras apresentados na tabela 1, com as respectivas variáveis conhecidas e desconhecidas para cada caso. A estratégia de solução consiste em dividir o problema em dois subsistemas e dividir as variáveis desconhecidas.

Tabela 1 – Tipos de barras para a solução do fluxo de potência

Tipo Barra	V. Conhecidas	V Desconhecidas
Slack	V_k, θ_k	P_k, Q_k
PV	P_k, V_k	Q_k, θ_k
PQ	P_k, Q_k	V_k, θ_k

No primeiro subsistema as variáveis desconhecidas são V_k e θ_k e por tanto a dimensão do subsistema é de $Dim_{s1} = 2N_{PQ} + N_{PV}$. Neste subsistema aplica-se uma técnica de solução numérica para sistemas algébricos de equações não lineares (Stagg, Glenn W and El-Abiad, Ahmed H and El-Abiad, 1968), sendo a função vetorial da forma apresentada em (1.6) e onde $[S_{dado}]$ é um vetor que tem as potências líquidas nas barras produto da operação $S_{líquida} = S_{gerada} - S_{carga}$ e $[S_{calculado}]$ corresponde às expressões (1.4) e (1.5). Uma solução é obtida quando $[\Delta S] = 0$.

$$[\Delta S] = [S_{dado} - S_{calculado}], \quad (1.6)$$

As técnicas de solução que vão ser estudadas vão se concentrar neste subsistema, já que para obter as resposta do subsistema 2, basta substituir as variáveis achadas na expressão (1.4) e (1.5). Para conhecer os fluxos a través das linhas substitui-se em (1.7) e (1.8), expressões que podem ser encontradas aplicando que $S = VI^*$ na equação (1.2).

$$P_{km} = G_{km}V_k^2 - G_{km}V_kV_m\cos\theta_{km} - B_{km}V_kV_m\sin\theta_{km}, \quad (1.7)$$

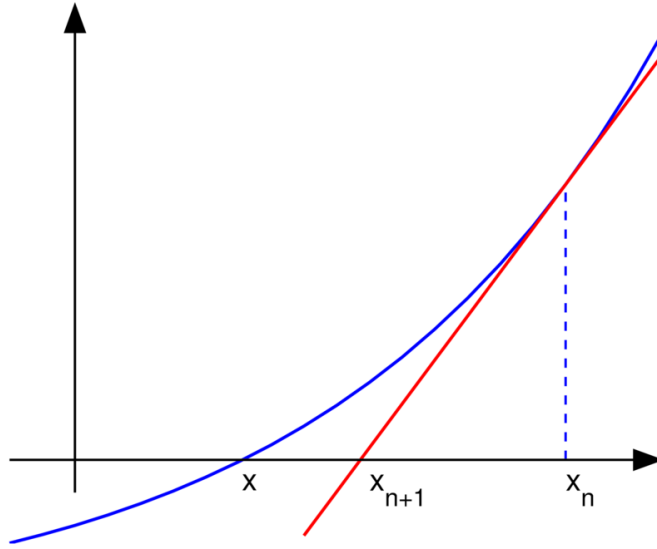
e

$$Q_{km} = -V_k^2(B_{km} + B_k^{sh}) + B_{km}V_kV_m\cos\theta_{km} - G_{km}V_kV_m\sin\theta_{km}. \quad (1.8)$$

1.3 Método de Newton-Raphson

O algoritmo de *Newton-Raphson* é ilustrado na Figura 2. O processo iterativo inicia propondo uma solução ao problema, posteriormente calcular o valor da função no ponto atual e linearizar o problema a través da série de Taylor e achar o intercepto com os eixos das variáveis independentes (achar x_{n+1}) e depois calcular o delta de essas variáveis e continuar com o processo iterativo.

Figura 2 – Ilustração do proceso iterativo do método de *Newton-Raphson*. Tomado de (??)



No método de *Newton-Raphson* precisa-se em cada iteração da derivada da função vetorial da equação (1.6) para conseguir solucionar a equação (1.9). As derivadas de funções vetoriais produzem a matriz Jacobiana que consiste na derivada parcial de cada uma das funções vetoriais com respeito a cada uma das variáveis independentes. Para conseguir aplicar o método de *Newton-Raphson* computacionalmente, deve-se desenvolver as expressões algébricas das derivadas. Nas equações (1.10-1.17) são apresentadas tais expressões (MONTICELLI, 1983).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (1.10)$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = -V_k^2 B_{kk} - Q_k \quad (1.11)$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (1.12)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = V_k G_{kk} + \frac{1}{V_k} P_k \quad (1.13)$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (1.14)$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = -V_k^2 G_{kk} + P_k \quad (1.15)$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (1.16)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = V_k B_{kk} + \frac{1}{V_k} Q_k \quad (1.17)$$

O fluxograma desse método é apresentado na Figura

1.4 Método desacoplado simultâneo

No método de *Newton-Raphson* pode-se observar tanto a potência ativa quanto a potência reativa dependem do ângulo θ e da magnitude da tensão nas barras. Porém, baseado em uma análise de sensibilidade ou uma análise das Equações (1.11-1.17), pode-se observar que em sistemas de transmissão de alta tensão as relações $\frac{\partial P}{\partial \theta}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ são muito maiores que as relações $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$. Para chegar à anterior conclusão basta com fazer as seguintes análises:

- Em sistemas de transmissão de alta tensão, a separação entre as fases deve ser maior para garantir o isolamento fato que causa um aumento da reatância série da linha (X_1) (e por tanto da susceptância (B_{km})) devido ao aumento do *GMD* (*Geometric Mean Distance*) (EPRI, 2005).
- Devido às compridas distâncias que percorrem as linhas de transmissão os condutores usados devem ter uma baixa resistência para garantir a regulação de tensão da linha.
- Em condições normais de operação os ângulos θ não são muito altos e as tensões nas barras tendem a 1 p.u.

Desse jeito, pode-se concluir que os termos G_{km} e $\sin \theta_{km}$ são muito menores que os termos B_{km} e $\cos \theta_{km}$.

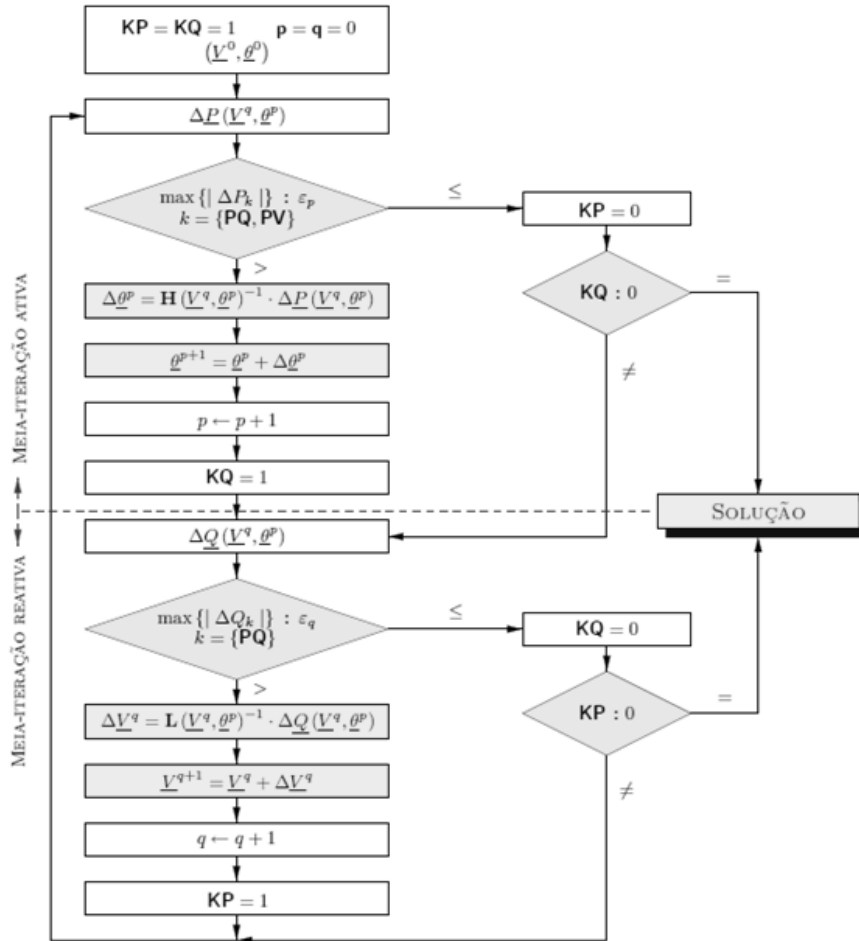
Assim, então pode-se afirmar que a potência ativa depende principalmente dos ângulos das tensões, e a potência reativa da magnitude das tensões. A consequência dessa afirmação é que pode-se fazer ZERO as submatrizes N e M da equação (1.9), e desse jeito consegue-se DESACOPLAR a potência ativa das magnitudes das tensões e a potência reativa dos ângulos.

1.5 Método desacoplado alternado

O método desacoplado alternado só apresenta uma diferença de ordem com respeito ao algoritmo simultâneo. Neste algoritmo, calcula-se primeiro o $\Delta\theta$, e obtém-se o θ_{n+1} . Depois de atualizar as variáveis θ_k , calcula-se a expressão (1.5), e verifica-se a convergência das tensões. Em caso de não convergir calcula-se a submatriz L e corrige-se o valor das tensões e inicia de novo outra iteração.

O fluxograma desse método é apresentado na Figura

Figura 3 – Ilustração do proceso iterativo do método desacoplado alternado



1.6 Método desacoplado rápido

O algoritmo do método desacoplado rápido é o mesmo dos algoritmo desacoplado alternado apresentado na Figura... Porém, a diferencia deste método é que são usadas equações da forma apresentada em (1.18) e (1.19), onde B' é a matriz Y_{barras} sem considerar a parte resistiva e B'' é a parte imaginaria da Y_{barras} considerando a parte resistiva. Estas expressões são baseadas nas seguintes aproximações que são validas para sistemas de transmissão com tensões maiores que 230 kV:

- Os termos $\cos\theta_{km}$ são muito próximos de 1.
- Os termos B_{km} são muito maiores que os termos $G_{km}\sin\theta_{km}$.
- Os termos $B_{kk}V)k^2$ são muito maiores que os termos Q_k .

$$\frac{\Delta\bar{P}}{V} = -B'\Delta\bar{\theta} \quad (1.18)$$

$$\frac{\Delta\bar{Q}}{V} = -B''\Delta\bar{V} \quad (1.19)$$

1.7 Método fluxo DC ou linearizado

Como foi analisado anteriormente, o fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão é aproximadamente proporcional à diferencia entre os ângulos das tensões das barras. Pode-se fazer mais aproximações que permitam linearizar o fluxo de potência e desenvolver o conhecido fluxo CC e obter resultados aceitáveis para algumas aplicações específicas como o planejamento de sistemas de potência. As aproximações que são precisadas neste caso são as seguintes

- As tensões em todas as barras são aproximadamente 1 p.u. De fato na operação dos sistemas de potência sempre procura-se isto.
- Os termos $\sin\theta_{km}$ são aproximadamente θ_{km} , já que na operação normal este ângulo tende a ser pequeno.
- Os termos B_{km} são aproximadamente $\frac{1}{x_{km}}$.

Se são feitas as anteriores aproximações pode-se reduzir a equação (1.7) do fluxo de potência ativa a través de uma linha de transmissão à equação (1.20), onde pode-se

observar que tem uma similaridade com a lei de ohm, onde a potência é análoga com a corrente e o ângulo com a tensão (MONTICELLI, 1983).

$$P_{km} = \frac{\theta_{km}}{x_{km}} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (1.20)$$

Dessa forma o fluxo de potência pode ser expressado como um sistema de equações lineares da forma $Ax = B$, como na equação (1.21), onde B' é a mesma matriz estudada no fluxo de potência desacoplado rápido.

$$P = B'\theta \quad (1.21)$$

1.7.1 Representação das perdas

As perdas neste método, podem ser representadas como cargas distribuídas nas barras do sistema. Para conseguir isso devem-se fazer duas iterações para solucionar dois sistemas de equações lineares da forma da equação (1.21). Na primeira solução, devem-se encontrar as perdas associadas a cada linha de transmissão de acordo com a equação (1.22) a qual é a mesma equação 1.7 depois de aplicar as considerações do fluxo linear. As perdas achadas para cada linha de transmissão são divididas por dois, para dividir uma parte para cada barra e dessa forma modificar o vetor P de potências líquidas nas barras e solucionar de novo o sistema incluindo as perdas.

$$P_{perdaskm} = G_{km}\theta_{km}^2. \quad (1.22)$$

2 Software

O software para calcular fluxo de potência foi desenvolvido em *MATLAB*®, pode ser redistribuído de acordo com os termos de licenciamento *GNU (General Public License V3)* e atualmente não conta com interface gráfica. O intercâmbio de informações de entrada e de saída com o usuário é feito a través de arquivos de texto e *MS EXCEL*®. Algumas considerações computacionais importantes para o desenvolvimento do software foram pesquisadas em (ARRILLAGA; ARNOLD, 1990) e (NATARAJAN et al., 2002).

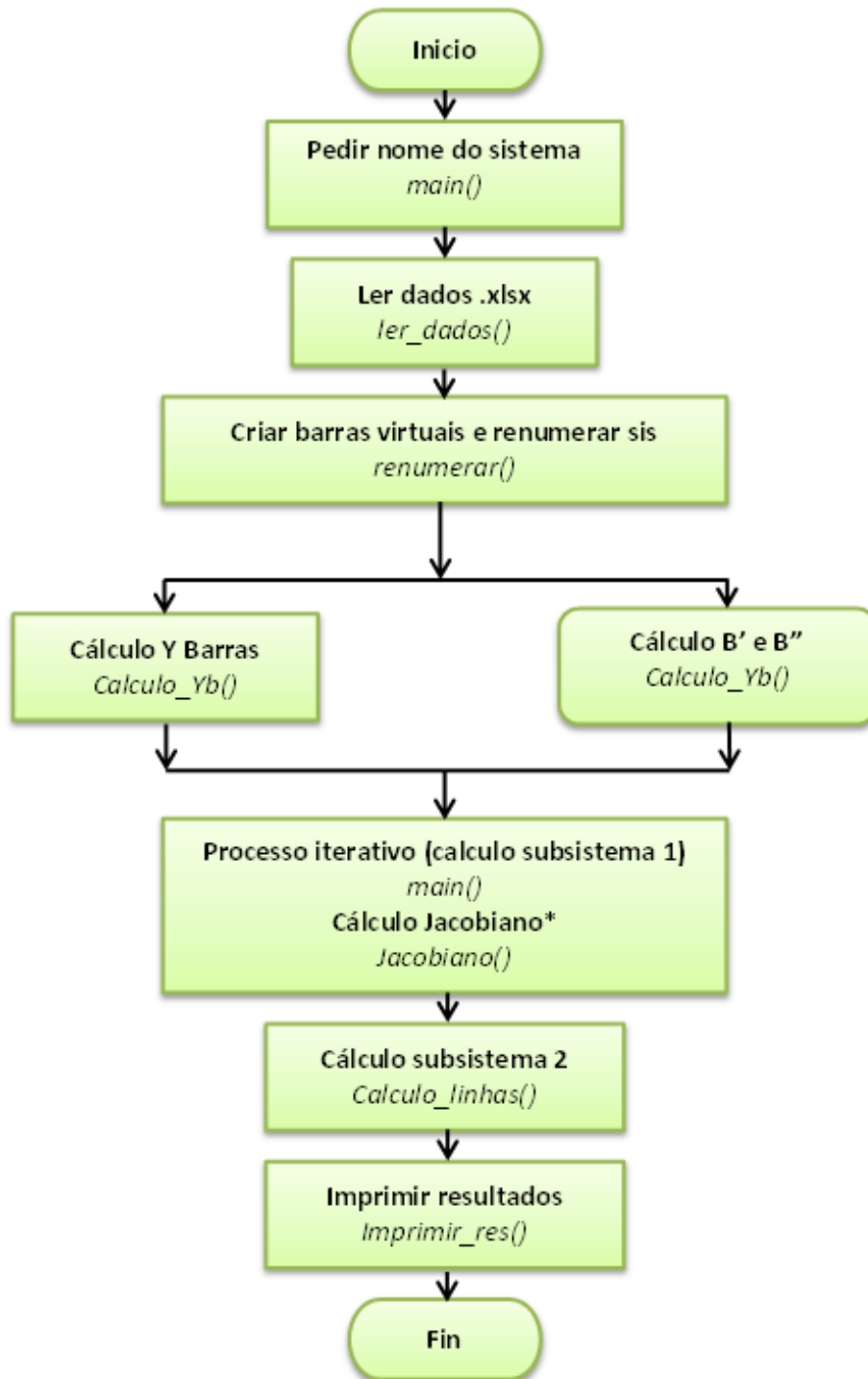
2.1 Algoritmo e fluxograma do software

O software foi desenvolvido com uma estrutura onde tem-se um arquivo principal para cada método de solução do fluxo de potência. Estes arquivos chamam as mesmas funções já que fazem processos que são precisados em todos ou em alguns dos métodos como por exemplo a leitura de dados, o cálculo da matriz de admitâncias, o cálculo do jacobiano ou a impressão de dados. Na Figura 4 é apresentado o fluxograma geral que usa o software para qualquer dos métodos estudados. Em letras itálicas estão escritos os nomes das funções que executam cada uma das tarefas pertencentes a cada bloco.

Alguns comentários em relação ao fluxograma da Figura 4 são feitos a continuação:

- O nome do sistema é pedido ao usuário para entrar por teclado quando ele executa o programa. Este nome, deve ser o nome do arquivo de *MS EXCEL*® que tem os dados do sistema elétrico de potência. O nome deve incluir a extensão do arquivo.
- *ler dados()* é uma função que abre o arquivo que tem os dados do sistema e devolve os seguintes dados: [Pbase, Vbase, Nlinhas, Nbarras, Dadoslinhas, Dadosbarras].
- Um dos problemas que pode-se ter nos dados que o usuário entrega, é que tenham barras Slack ou PV com cargas. Nesse caso teria-se P dado e Q dado em barras onde não vai-se calcular Delta P nem Delta Q. A solução implementada, foi criar barras virtuais para tais cargas, ligadas à barra original a través de uma linha de impedância muito baixa. A tarefa é executada na função **renumerar()**, que também faz uma renumeração para reordenar as barras no seguinte ordem: Primeiro as barras PQ criadas, barras PQ originais, depois as barras PV e finalmente a barra Slack. O anterior com o objetivo de facilitar o cálculo do jacobiano.
- A matriz de admitâncias do sistema é calculada posteriormente na função *calculo Yb*. No caso dos métodos do fluxo desacoplado rápido ou linear, são calculadas as matrizes B' e B''.

Figura 4 – Fluxograma geral do software



- Posteriormente inicia o processo iterativo dentro da função principal, a qual chama a função *jacobiano* em cada iteração nos métodos que é precisado tal cálculo.
- Depois de achar uma solução, é chamada a função *calcula linhas* que fornece os resultados de potências, perdas e correntes em todas as linhas de transmissão do sistema.
- Finalmente a função *imprimir res* é chamada para fornecer os resultados obtidos em

um arquivo de texto com o seguinte formato "Resultado fluxo', 'nome sistema', '-', id método, 'txt'".

2.2 Arquivos de entrada e de saída

Para a entrada dos dados do sistema deve-se usar um arquivo em *MS EXCEL*® com a formatação apresentada na Figura 5. É importante que sempre existam duas linhas vazias entre os valores bases e os dados das linhas, e uma linha livre entre estes últimos e os dados das barras. Pode-se adicionar mais linhas simplesmente adicionando filas na folha de cálculo, a qual deve ter por nome "Hoja 1".

Figura 5 – Exemplo do arquivo de entrada do sistema de 4 barras em *MS EXCEL*®

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	P Base [MW]	100		Dados em pu	0			
2	V Base [kV]	230						
3	Num Linhas	4						
4								
5								
6	DATOS Líneas							
7	Barra i	Barra j	R [pu]	X [pu]	Y/2 [pu]			
8	10	22	0.01008	0.0504	0.05125			
9	10	33	0.00744	0.0372	0.03875			
10	22	44	0.00744	0.0372	0.03875			
11	33	44	0.01272	0.0636	0.06375			
12								
13	Datos Barras		Gen		Carga			
14	Barra	Tipo	Pg [MW]	Qg [Mvars]	Pl [MW]	Ql [Mvars]	V [pu]	Ang [°]
15	10	1	0	0	50	-30.99	1	0
16	22	3	0	0	170	105.35	1	0
17	33	3	0	0	200	123.94	1	0
18	44	2	318	0	80	0	1.02	0
19								

O arquivo de saída, é um arquivo de texto que tem os dados básicos de entrada, os cálculos de potência, corrente e perdas pelas linhas, e os cálculos de Tensões e ângulos nas barras junto com a potência gerada e consumida. Na Figura 6 é apresentado o arquivo de saída que o software gerou para os dados de entrada apresentados na Fig 5.

Figura 6 – Exemplo do arquivo de texto da saída para o sistema de 4 barras

```

Resultado: fluxo_Datos_ej1.xlsx-1nr: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
=====
||||| DADOS BÁSICOS DE ENTRADA |||||
=====
Data:19-Sep-2014 13:09:12
Nome do sistema:Datos_ej1.xlsx
Método Usado:1nr
Potência base=100MW Tensão Base=230kV
Barras=4
Numero de Linhas:4
ITERAÇÕES =3

=====
||||| RESULTADOS LINHAS |||||
=====
Bus i Bus j Pij [MW] Qij [Mvars] Pji [MW] Qji [Mvars] |Iij| [pu] <Iij [°] Perdas [MW] Perdas [Mvars]
10.0 22.0 38.688 27.422 -38.462 -26.289 0.474 -35.329 0.227 1.133
10.0 33.0 98.107 65.076 -97.075 -59.920 1.177 -33.557 1.031 5.156
22.0 44.0 -131.535 -70.371 133.250 78.948 1.518 150.877 1.715 8.577
33.0 44.0 -102.910 -54.379 104.745 63.555 1.201 150.275 1.835 9.176

=====
||||| RESULTADOS BARRAS |||||
=====
Bus i V [p.u.] delta [°] Pg [MW] Qg [Mvars] Pl [MW] Ql [Mvars] Pc [MW] Qc [Mvars]
33.0 0.969 -1.872 0.000 0.000 200.000 123.940 -199.985 -123.924
22.0 0.982 -0.976 0.000 0.000 170.000 105.350 -169.997 -105.346
44.0 1.020 1.523 318.000 131.839 80.000 0.000 237.996 131.839
10.0 1.000 0.000 186.795 52.508 50.000 -30.990 186.795 52.508

**As barras do sistema foram renumeradas de tal forma que a última barra é a barra slack, e as primeiras barras são as PQ.
copyright (C) <2014> <Sebastián de Jesús Manrique Machado> <e-mail:sebjmanrique747@gmail.com>

```


3 Testes, Resultados e discussão

3.1 Sistema 4 Barras do livro de Stevenson

No livro clássico de análise de sistemas de potência (GRAINGER; STEVENSON, 1994), é apresentado um exemplo com o sistema de potência mostrado na Figura 7. Os valores base são $P_{base} = 100$ MVA e $V_{Base}=230$ kV. Além da Figura, são apresentados na Tabela 2 os valores em *p.u.* da impedância série e as susceptâncias do circuito π equivalente das linhas de transmissão. Os dados de carga esperados e geração despachada para as unidades de geração são apresentados na Tabela 3

Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema de 4 barras

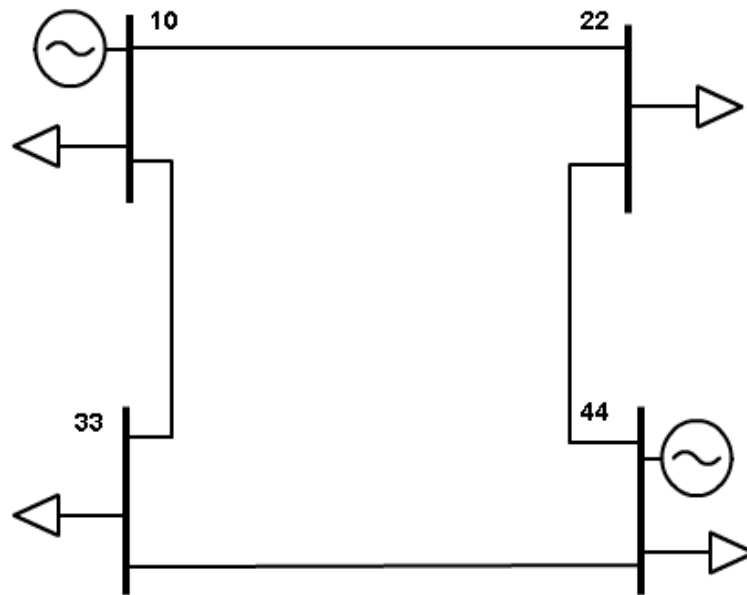


Tabela 2 – Dados das linhas de transmissão do sistema de 4 barras (GRAINGER; STEVENSON, 1994)

Barra i	Barra j	R [pu]	X [pu]	Y/2 [pu]
10	22	0.01008	0.0504	0.05125
10	33	0.00744	0.0372	0.03875
22	44	0.00744	0.0372	0.03875
33	44	0.01272	0.0636	0.06375

O resultado do fluxo de potência considerando uma tolerância de 0.0005 é apresentado nas tabelas 4 e 5. Pode-se conferir que estos resultados são os mesmos que foram obtidos em (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Tabela 3 – Dados de geração e carga nas 4 barras do sistema de potência em (GRAINGER; STEVENSON, 1994)

Barra	Tipo	Pg [MW]	Qg [Mvars]	Pl [MW]	Ql [Mvars]	V [pu]	Ang [°]
10	1	0	0	50	-30.99	1	0
22	3	0	0	170	105.35	1	0
33	3	0	0	200	123.94	1	0
44	2	318	0	80	0	1.02	0

Tabela 4 – Resultado do fluxo de potência a través das linhas do sistema de 4 barras considerando uma tolerância de 0.0005

Bus i	Bus j	Pij [MW]	Qij [Mvars]	Iij [pu]	<Iij [°]	Perdas [MW]	Perdas [MVars]
10	22	38.688	22.298	0.447	-29.955	0.227	-8.938
10	33	98.107	61.212	1.156	-31.959	1.031	-2.356
22	44	-131.535	-74.114	1.537	149.625	1.715	0.806
33	44	-102.91	-60.371	1.231	147.731	1.835	-3.441

Tabela 5 – Resultado do fluxo de potência para o sistema de 4 barras considerando uma tolerância de 0.0005

Bus i	V [p.u.]	delta [°]	Pg [MW]	Qg [Mvars]	Pl [MW]	Ql [Mvars]
33	0.969	-1.872	0	0	200	123.94
22	0.982	-0.976	0	0	170	105.35
44	1.02	1.523	318	131.839	80	0
10	1	0	186.795	52.508	50	-30.99

3.2 Sistema IEEE de 14 barras

O sistema para testes IEEE de 14 barras representa uma porção do sistema elétrico de potência dos Estados Unidos da região centro oeste em fevereiro de 1962. Na Fig 8 é apresentado o diagrama unifilar deste sistema, onde pode-se observar que existem dois geradores síncronos e além disso tem-se três compensadores síncronos que são representados dentro do algoritmo como barras tipo PV. Os compensadores síncronos não podem gerar potência ativa, e é uma das considerações importantes dentro dos dados que devem-se incluir na Tabela 7. Na Tabela 6 são apresentados os valores em *p.u.* da impedância série e as susceptâncias do circuito π equivalente das linhas de transmissão ou dos transformadores de potência. Os dados que foram mencionados são obtidos diretamente do site da Universidade de Washington, a qual tem um banco de dados de todos os sistemas de teste da IEEE (College of Engineering of the University of Washington,).

Os sistemas de teste IEEE são típicos *benchmarks* nos estudos de fluxo de potência, especialmente o sistema de 14 barras. É por causa disso que normalmente os softwares comerciais e acadêmicos normalmente trazem nos exemplos estes sistemas de teste.

Tabela 6 – Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 14 barras

Barra i	Barra j	R [pu]	X [pu]	Y/2 [pu]	Tap
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0374	1
2	5	0.05695	0.17388	0.0340	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0346	1
4	5	0.01335	0.04211	0.0128	1
4	7	0	0.20912	0	0.978
4	9	0	0.55618	0	0.969
5	6	0	0.25202	0	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0	1
6	12	0.12291	0.25581	0	1
6	13	0.06615	0.13027	0	1
7	8	0.00001	0.17615	0	1
7	9	0	0.1101	0	1
9	10	0.03181	0.0845	0	1
9	14	0.12711	0.27038	0	1
10	11	0.08205	0.19207	0	1
12	13	0.22092	0.19988	0	1
13	14	0.17093	0.34802	0	1

Tabela 7 – Dados de geração e carga nas barras do sistema IEEE de 14 barras

Barra	Tipo	Pg [pu]	Qg [pu]	Pl[pu]	Ql [pu]	V [pu]	Ang [°]
1	2	2.32	0	0	0	1	0
2	1	0	0	0.217	0.127	1	0
3	2	0	0	0.942	0.19	1.01	0
4	3	0	0	0.478	0	0.98	0
5	3	0	0	0.076	0.016	1	0
6	2	0	0	0.112	0.075	1	0
7	3	0	0	0	0	1	0
8	2	0	0	0	0	1.02	0
9	3	0	0	0.295	0.166	1	0
10	3	0	0	0.09	0.058	1	0
11	3	0	0	0.035	0.018	1	0
12	3	0	0	0.061	0.016	1	0
13	3	0	0	0.135	0.058	1	0
14	3	0	0	0.149	0.05	1	0

Tabela 8 – Resultado do fluxo de potência a través das linhas do sistema IEEE de 14 barras considerando uma tolerância de 0.0005

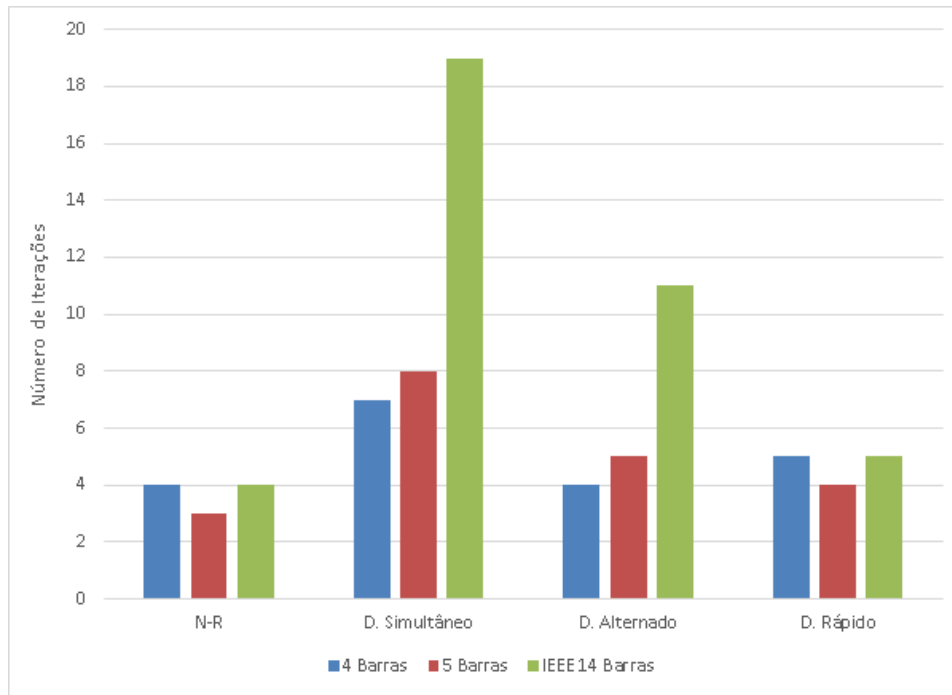
Bus i	Bus j	Pij [MW]	Qij [Mvars]	Iij [pu]	<Iij [°]	Perdas [MW]	Perdas [MVars]
1	2	157.533	-48.145	1.647	22.821	5.166	5.211
1	5	74.467	-10.456	0.752	13.819	3.013	2.727
2	3	71.467	-20.798	0.744	16.225	2.527	1.797
2	4	52.439	-9.883	0.534	10.673	1.62	-2.454
2	5	38.786	-7.049	0.394	10.3	0.864	-4.071
3	4	-20.26	19.887	0.281	-144.027	0.63	-5.279
4	5	-57.761	14.044	0.603	-171.929	0.491	-0.939
4	7	24.843	-0.035	0.252	-5.515	0	1.33
4	9	15.048	3.728	0.157	-19.509	0	1.378
5	6	43.524	-2.777	0.442	-0.389	0	4.924
6	11	6.863	7.411	0.101	-57.624	0.097	0.203
6	12	7.851	3.035	0.084	-31.559	0.087	0.181
6	13	17.61	9.261	0.199	-38.163	0.262	0.516
7	8	-5	-18.72	0.196	96.295	0	0.68
7	9	29.843	17.355	0.35	-38.839	0	1.348
9	10	5.78	0.502	0.06	-15.595	0.011	0.03
9	14	9.611	1.255	0.1	-18.073	0.128	0.271
10	11	-3.232	-5.328	0.065	110.315	0.034	0.08
12	13	1.664	1.254	0.021	-48.375	0.01	0.009
13	14	5.502	4.19	0.071	-48.701	0.086	0.175

Tabela 9 – Resultado do fluxo de potência para o sistema IEEE de 14 barras considerando uma tolerância de 0.0005

Bus i	V [p.u.]	delta [°]	Pg [MW]	Qg [Mvars]	Pl [MW]	Ql [Mvars]
14	0.952	-12.148	0	0	14.9	5
13	0.976	-11.409	0	0	13.5	5.8
12	0.983	-11.376	0	0	6.1	1.6
11	0.979	-10.81	0	0	3.5	1.8
10	0.965	-10.921	0	0	9	5.8
9	0.968	-10.631	0	0	29.5	16.6
7	0.987	-8.659	0	0	0	0
5	0.987	-4.04	0	0	7.6	1.6
4	0.985	-5.595	0	0	47.8	0
8	1.02	-8.158	5	19.399	0	0
6	1	-10.423	0	34.909	11.2	7.5
3	1.01	-8.495	5	61.481	94.2	19
1	1	5.827	232	-58.601	0	0
2	1	0	32.025	28.327	21.7	12.7

- O método desacoplado rápido apresentou em geral um número menor de iterações para conseguir a convergência, comparado com os outros dos métodos desacoplados. Desse jeito, pode-se afirmar que é um algoritmo computacionalmente eficiente já que não precisa calcular a matriz jacobiana em cada iteração.

Figura 9 – Comparação do número de iterações para conseguir a convergência de cada método para diferentes sistemas



3.4 Resultados do fluxo DC e análise de erro

Além dos algoritmos exatos, existe o método linearizado ou também conhecido como fluxo de potência DC o qual foi estudado no capítulo 1. O fluxo DC somente oferece os resultados de potência ativa, tensões e ângulos nas barras; porém são resultados aproximados.

Nesta seção, é feita uma comparação entre os resultados obtidos a través do fluxo DC com os obtidos com métodos exatos, neste caso a análise foi feita com base no sistema IEEE de 14 barras. A comparação é feita a través do erro porcentual relativo. Para isso, primeiro precisa-se de obter os resultados do fluxo DC, os quais apresentam-se nas Tabelas 10 e 11. Estes resultados consideram a representação das perdas nas linhas como cargas distribuídas nas barras. Além disso, com o objetivo de fazer uma comparação da potência tanto do nodo "i" para o nodo "j" quanto a potência do nodo "j" para o nodo "i", na hora de imprimir os resultados fez-se a seguinte consideração: a potência da linha no nodo que receptor é obtida como a potência calculada para a linha (a mesma do nodo que envia) menos a potência de perdas total associada à linha que foi calculada na iteração 1.

Tabela 10 – Resultado do fluxo de potência CC para as linhas do sistema IEEE de 14 barras

Bus i	Bus j	Pij [MW]	Iij [pu]	<Iij [°]	Perdas [MW]	Pji [MW]
1	2	176.024	1.687	22.851	5.423	-170.601
1	5	78.44	0.77	18.194	3.14	-75.3
2	3	72.124	0.71	12.755	2.314	-69.81
2	4	56.317	0.546	19.184	1.662	-54.654
2	5	40.717	0.398	20.819	0.853	-39.865
3	4	-25.05	0.226	-173.675	0.376	25.426
4	5	-67.12	0.641	-168.368	0.556	67.676
4	7	25.808	0.258	-7.235	0	-25.808
4	9	15.802	0.158	-8.207	0	-15.802
5	6	41.09	0.411	-7.023	0	-41.09
6	11	7.102	0.064	15.131	0.039	-7.063
6	12	8.882	0.08	15.022	0.079	-8.803
6	13	21.246	0.189	16.138	0.237	-21.008
7	8	-5	0.05	171.474	0	5
7	9	30.808	0.308	-9.753	0	-30.808
9	10	7.669	0.072	9.718	0.016	-7.652
9	14	12.69	0.115	13.471	0.168	-12.523
10	11	-2.695	0.025	-167.816	0.005	2.7
12	13	2.479	0.017	36.429	0.006	-2.473
13	14	5.594	0.05	14.025	0.043	-5.551

Tabela 11 – Resultado do fluxo de potência CC para o sistema IEEE de 14 barras

Bus i	V [p.u.]	delta [°]	Pg [MW]	Qg [Mvars]	Pl [MW]
14	1	-12.691	0	0	14.9
13	1	-11.576	0	0	13.5
12	1	-11.292	0	0	6.1
11	1	-10.799	0	0	3.5
10	1	-11.096	0	0	9
9	1	-10.725	0	0	29.5
7	1	-8.782	0	0	0
5	1	-4.057	0	0	7.6
4	1	-5.689	0	0	47.8
8	1	-8.277	5	0	0
6	1	-9.99	0	0	11.2
3	1	-8.181	5	0	94.2
1	1	5.968	232	0	0
2	1	0	366.882	0	21.7

Os resultados de erro relativo para as linhas e barras do sistema IEEE de 14 barras são apresentados nas tabelas 12 e 13. Pode-se observar que a aproximação é muito boa, e nos casos que o erro é elevado é devido a que os valores são muito pequenos então uma pequena desviação, gera um porcentagem alto de erro. Por exemplo na potência pela linha de 12 para o nodo 13 é de 2.479 MW de acordo com a Tabela 12, equanto pelo método exacto foi obtido 1.664 MW de acordo com a tabela 8. O anterior gera um erro relativo de quase 49 %; porém, isto corresponde a menos de 1 MW. O anterior oferece uma alternativa apropriada para estudos como os de planejamento da transmissão onde tem-se muitas incertezas e somente precisa-se de dados estimados.

Tabela 12 – Análise de erro relativo para os resultados associados as linhas do sistema IEEE de 14 barras

Bus i	Bus j	Erro Pij [%]	Erro Pji [%]	Erro Perdas[%]
1	2	11.7378581	-11.9664234	4.97483546
1	5	5.33524917	-5.38248384	4.21506804
2	3	0.91930541	-1.26196693	8.42896715
2	4	7.39525925	-7.54639013	2.59259259
2	5	4.97860053	-5.12367491	1.27314815
3	4	-23.6426456	21.7195653	40.3174603
4	5	-16.2029743	16.1779853	13.2382892
4	7	3.88439399	-3.88439399	NA
4	9	5.01063264	-5.01063264	NA
5	6	5.59231688	-5.59231688	NA
6	11	3.48244208	-4.38959503	59.7938144
6	12	13.1320851	-13.3822772	9.1954023
6	13	20.6473595	-21.0975329	9.54198473
7	8	0	0	NA
7	9	3.23358912	-3.23358912	NA
9	10	32.6816609	-32.6629681	45.4545455
9	14	32.0362085	-32.0573658	31.25
10	11	-16.615099	17.3300674	85.2941176
12	13	48.9783654	-49.5163241	40
13	14	1.67211923	-2.47369393	50

Tabela 13 – Análise de erro relativo para os resultados associados as barras do sistema IEEE de 14 barras

Bus i	Erro V [%]	Erro delta [%]
14	5.04201681	-4.46987158
13	2.45901639	-1.46375668
12	1.7293998	-0.73839662
11	2.14504597	-0.10175763
10	3.62694301	-1.60241736
9	3.30578512	-0.88420657
7	1.31712259	-1.42048735
5	1.31712259	-0.42079208
4	1.52284264	-1.68007149
8	1.96078431	-1.45869086
6	0	-4.1542742
3	0.99009901	-3.69629194
1	0	2.41977004
2	0	NA

4 Trabalho futuro

Algumas das possibilidades que podem-se aproveitar para expandir as características do software são as seguintes:

- Integrar ao código um módulo de análises de contingências n-1.
- Código para o fluxo de potência continuado para análises de estabilidade de tensão a través de curvas P-V ([AJJARAPU; CHRISTY, 1992](#); [MILANO, 2005](#)).
- Fazer um módulo de fluxo ótimo de potência ([MILANO, 2005](#)).
- Na atualidade o mercado oferece *PMU's (Phasor Units Measure)*, os quais são dispositivos que por médio de sinal de *GPS* conseguem reproduzir em tempo real os valores das variáveis elétricas em modo de fasor. Dese jeito é possível a implementação de controles que gerem mais de um nodo Slack. Em outras palavras, um controle similar ao *AGC* que consegue manter constante o ângulo de separação entre duas usinas geradoras. Poderia-se fazer estudos estáticos com este software sob as vantagens e possíveis aplicações deste tipo de controle.
- Criar uma interface gráfica que permita o intercâmbio de informações com o usuário.

Conclusão

Tem-se analisado e estudado os diferentes métodos para a solução do fluxo de potência tanto desde o ponto de vista teórico quanto desde o ponto de vista computacional. O anterior foi feito a través de testes sob um sistema típico de 4 barras e o sistema IEEE de 14 barras.

Foi apresentado um software para calcular fluxo de potência que foi desenvolvido em *MATLAB*®, e tem licenciamento *GNU (General Public License V3)*. Tem sido explicados todos os detalhes do funcionamento do software tanto a nível de usuário como a nível de programador. Foram explicadas as principais características dos arquivos de entrada e saída e o código é de livre acesso ¹

Os resultados obtidos nos testes realizados foram consistentes com os resultados publicados na literatura, e por tanto pode-se afirmar que os algoritmos estão corretamente implementados no software e os dados de saída deste são confiáveis.

A través de uma análise de número de iterações para conseguir a convergência em cada método foi possível concluir que o método computacionalmente mais eficiente é o desacoplado rápido. Também pode-se afirmar que existe uma correlação praticamente nula entre o número de barras e o número de iterações que deve fazer o algoritmo Newton-Raphson, enquanto os algoritmos Desacoplados simultâneo e alternado apresentam uma correlação proporcional entre o número de barras do sistema e o número de iterações.

Os resultados obtidos a través do método do fluxo de potência linearizado foi analisado mediante uma análise de erro dos resultados obtidos em contraste com os resultados obtidos a través de métodos exatos como o método de Newton-Raphson ou os métodos desacoplados. Conseguiu-se observar que os erros são admissíveis dependendo do tipo de estudo que está se fazendo e desse jeito pode-se aproveitar melhor os recursos computacionais.

Foram apresentadas algumas das ideias para expandir as características do software, ou para aproveitar as características atuais em estudos e pesquisas que podem ter resultados de impacto.

¹ <https://www.dropbox.com/sh/zui6hhyrdfs0pok/AABs_UWNBljjo9beujCGBaya?dl=0>

Referências

AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation Power Flow: A tool for ateady State Voltage Stability Analysis. *Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 416–423, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 41.

ARRILLAGA, J.; ARNOLD, C. *Computer Analysis of Power Systems*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1990. ISBN 0 471 92760 0. Disponível em: <<http://eu.wiley.com/WileyRemoteAPI/Title.rapi?isbn=0471927600>>. Citado na página 27.

College of Engineering of the University of Washington. Power Systems Test Case Archive. Disponível em: <<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Citado na página 32.

EPRI. AC transmission line reference book - 200 kV and above epr 2005. Electric Power Research Institute, Palo Alto, 2005. Citado na página 23.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994. 814 p. ISBN 0070612935. Citado 5 vezes nas páginas 9, 19, 20, 31 e 32.

HASSAN, H. A.; OSMAN, Z. H.; LASHEEN, A. E.-a. Sizing of STATCOM to Enhance Voltage Stability of Power Systems for Normal and Contingency Cases. *Smart Grid and Renewable Energy*, v. 5, n. January, p. 8–18, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/sgre.2014.51002>>. Citado na página 34.

MILANO, F. An Open Source Power System Analysis Toolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1199–1206, ago. 2005. ISSN 0885-8950. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1490569>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 41.

MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo: E. Blucher, 1983. 163 p. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 26.

NATARAJAN, R. et al. *Computer-Aided Power System Analysis*. CRC Press, 2002. (Power Engineering (Willis), v. 15). ISBN 978-0-8247-0699-9. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/9780203910832>>. Citado na página 27.

SRIKANTH, P. et al. Load Flow Analysis Of IEEE 14 Bus System Using MATLAB. *International Journal of Engineering Research & Technology*, v. 2, n. 5, p. 149–155, 2013. Citado na página 17.

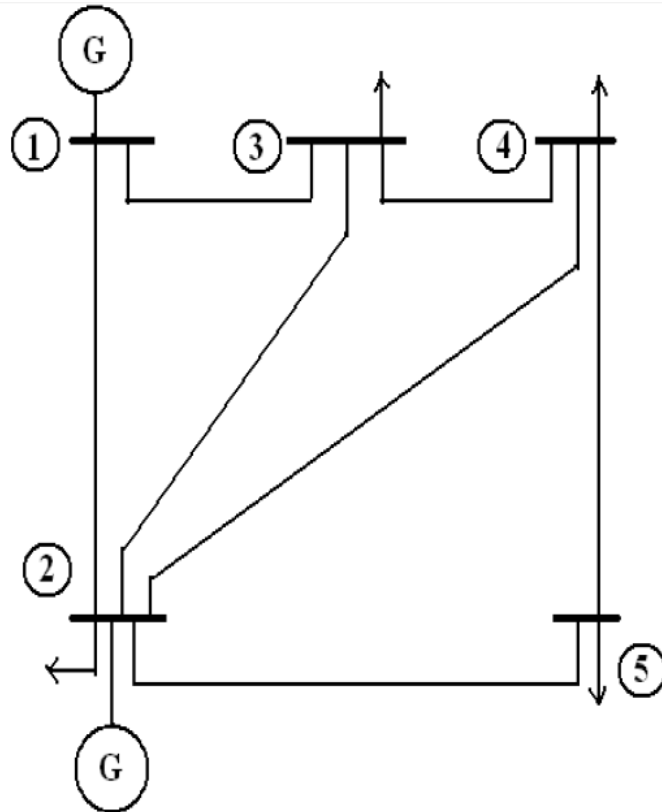
Stagg, Glenn W and El-Abiad, Ahmed H and El-Abiad, A. *Computer methods in power system analysis*. New York: McGraw-Hill New York, 1968. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Computer+Methods+In+Power+System+Analysis\#0>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 34.

Anexos

ANEXO A – Sistema de 5 barras

O diagrama unifilar mostrado na Figura 10 corresponde ao sistema de potência de 5 barras.

Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema de 5 barras



Os dados de entrada para este sistema são apresentados nas tabelas 14 e 15. Para olhar os resultados obtidos no software, por favor ver o ANEXO B.

Tabela 14 – Dados de geração e carga nas barras do sistema de 5 barras

Barra i	Barra j	R [pu]	X [pu]	Y/2 [pu]
1	2	0,02	0,06	0,03
1	3	0,08	0,24	0,025
2	3	0,06	0,18	0,02
2	4	0,06	0,18	0,02
2	5	0,04	0,12	0,015
3	4	0,01	0,03	0,01
4	5	0,08	0,24	0,025

Tabela 15 – Dados das barras de transmissão do sistema de 5 barras

Barra	Tipo	Pg [MW]	Qg [Mvars]	Pl [MW]	Ql [Mvars]
1	1	0	0	0	0
2	2	40	0	20	10
3	3	0	0	45	15
4	3	0	0	40	5
5	3	0	0	60	10

ANEXO B – Código Fonte e exemplos

No site <https://www.dropbox.com/sh/zui6hhyrdfs0pok/AABs_UWNBlljjo9beujCGBaya?dl=0> pode-se descarregar o código do software, os arquivos de entrada e de saída dos testes feitos e este documento.

Formulário de Identificação

Formulário de Identificação, compatível com o Anexo A (informativo) da ABNT NBR 10719:2011. Este formulário não é um anexo. Conforme definido na norma, ele é o último elemento pós-textual e opcional do relatório.

Dados do Relatório Técnico e/ou científico			
Título: Relatório técnico da implementação de um software para o cálculo do fluxo de potência		Classificação de segurança	
		No.	
Tipo de relatório: Técnico-Acadêmico		Data: 01-10-2014	
Título do projeto: Desenvolvimento de um software para o cálculo de Fluxo de Potência		No.	
Autor(es): Sebastián de Jesús Manrique Machado			
Instituição executora: Universidade Estadual de Londrina-CTU			
Instituição patrocinadora: CAPES			
Resumo			
Palavras-chave/descriptores: Fluxo de potência, Técnicas de solução, análise comparativa, Sc			
Edição	No. de páginas: 53	No. do volume	Nº de class
ISSN		Tiragem	Preg
Distribuidor			
Observações/notas			