

CAPÍTULO 2

O ALGORITMO DE FPP

2.1. INTRODUÇÃO

O algoritmo apresentado neste capítulo é basicamente aquele descrito nas referências 3 e 4 e aperfeiçoado em 14, 19, 20 e 21. O referido algoritmo, desenvolvido no Departamento de Engenharia Elétrica da PUC/RJ, utiliza uma solução semi-analítica combinando técnicas de convolução matemática com Simulação Monte Carlo, usando equações linearizadas de fluxo de potência. Através do vetor de estado obtido pelas equações linearizadas, o vetor de saída é calculado usando as equações não lineares originais do fluxo de potência.

No estágio atual de desenvolvimento do algoritmo não são representadas as incertezas associadas à hidrologia e à topologia da rede. As cargas podem ser modeladas por qualquer distribuição e possíveis correlações, entretanto, não são representadas as incertezas associadas ao longo prazo. A geração fica definida pelas indisponibilidades das unidades geradoras e pela política de despacho utilizada. O balanço de potência do sistema é realizado através de uma divisão percentual da carga pelas usinas, baseado na produtividade das mesmas.

2.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de fluxo de potência pode ser matematicamente descrito por um conjunto de duas equações não lineares, quais sejam:

$$Y = g(X) \quad (2.1)$$

$$Z = h(X) \quad (2.2)$$

onde:

Y = vetor de entrada (injeções de potência)

X = vetor de estado (tensão/ângulos)

Z = vetor de saída (fluxos, etc.)

g e h = equações não lineares de fluxo de potência.

Uma vez especificado o vetor Y, obtém-se o vetor de estado X, para então se avaliar o vetor de saída Z.

No caso do fluxo de potência probabilístico, a natureza estatística dos parâmetros de entrada é considerada e os vetores X, Y e Z são tratados como variáveis aleatórias, representadas por suas funções densidade de probabilidade. Neste caso, a maior dificuldade está em resolver a equação (2.1) que é uma equação não-linear, normalmente solucionada através de um processo iterativo. Uma maneira eficiente de contornar esta dificuldade é linearizar a equação (2.1), em torno do valor esperado de Y. Esta linearização reduz bastante o esforço computacional e supera os usuais problemas de convergência na solução de tal equação.

Linearizando a equação (2.1) em torno do ponto de

operação esperado Y_1 tem-se:

$$(X - X_1) = A (Y - Y_1) \quad (2.3)$$

onde X_1 é tal que:

$$Y_1 = g(X_1) \text{ e}$$

$$A = \left[\frac{\partial g}{\partial X} \right]^{-1} \text{ em } X = X_1$$

A matriz A é chamada matriz dos coeficientes de sensibilidade (para uma dada configuração). O vetor X_1 é obtido através da solução de um fluxo de potência determinístico, usando como dados de entrada o vetor $Y = Y_1$.

Aplicando o operador valor-esperado $E[\cdot]$ à equação (2.3) tem-se:

$$E[X] = X_1 + A (E[Y] - Y_1) \quad (2.4)$$

Portanto, se o ponto de linearização Y_1 é escolhido como sendo o valor-esperado de Y , i.e. $Y_1 = E[Y]$, o valor esperado de X passa a ser aproximadamente igual a X_1 . Foi dito aproximadamente pois a equação (2.3) é aproximação linear de (2.1). A escolha deste ponto de linearização minimiza os erros introduzidos nas grandezas a serem avaliadas, visto que é em torno deste ponto que se encontra, em princípio, uma quantidade maior de informação.

Assim, considerando uma ocorrência $Y(k)$ do vetor aleatório Y , dentro da região de linearização, as ocorrências $X(k)$ e $Z(k)$ correspondentes são obtidas pela solução do sistema de equações lineares (2.3) e pela equação não linear (2.2), respectivamente.

O uso da equação (2.1), linearizada em torno do valor esperado de Y pode ser considerada como sendo uma solução razoavelmente precisa, quando o grau de incerteza das variáveis de entrada não é alto [22]. Entretanto quando o nível de incerteza se torna cada vez maior ou quando diversos níveis de carga precisam ser avaliados conjuntamente, um único ponto de linearização pode não ser suficiente para garantir uma boa precisão dos resultados. Neste caso deve-se utilizar um algoritmo de simulação multi-linear [20,21].

2.3. CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAS NODAIS

Existem várias razões para o aparecimento de correlação entre potências nodais. Tais razões dependem de que comportamento, se carga/carga, geração/carga ou geração/geração, está sendo analisado.

As cargas tendem a crescer ou diminuir em função de variações climáticas e hábitos das pessoas e até mesmo eventos sociais. Caso estes fatores afetem um grupo de cargas de uma mesma maneira, existirá um certo grau de dependência entre estas cargas. Particularmente, se uma relação linear é assumida para esta dependência, sua modelagem se torna extremamente simples [3,4].

Correlações envolvendo a geração existem por causa da necessidade de se balancear a potência ativa do sistema. Este balanceamento é feito de acordo com a política operativa da concessionária que inclui critérios de despacho e de corte de carga. Uma solução analítica para este problema não é possível, visto que mesmo o mais simples critério de despacho acarreta em mais uma não-linearidade a ser considerada no problema de FPP.

Uma solução eficiente para este caso é simular a equação de balanço de potência do sistema, para cada ocorrência $Y(k)$. Para um sorteio k , a equação de balanço de potência ativa do sistema é dada por:

$$\sum_i YG_i(k) = D(k) + \text{Perdas}(k), \text{ com } i = 1, N_g \quad (2.5)$$

sendo,

$$D(k) = \sum_i YD_i(k), \text{ com } i = 1, N_c$$

onde:

N_g = número de geradores

N_c = número de cargas

YG = subvetor de potências ativas geradas de Y

YD = subvetor de cargas ativas de Y

D = carga total do sistema para o sorteio k

Um processo de convolução é usado para se obter a distribuição de probabilidade de D . As cargas correlacionadas linearmente são agrupadas antes da aplicação do processo de convolução [3,4].

O valor da potência ativa $YG_i(k)$ a ser fornecida por cada unidade geradora está condicionada a sua classificação como usina de base ou de ponta [3]. As unidades de base ou independentes são aquelas que operam 24 horas por dia, na sua capacidade nominal, independentemente do nível de carga do sistema. Sua geração está relacionada apenas às taxas de saída forçada das máquinas. As unidades de ponta, ou dependentes, englobam as unidades intermediárias e de ponta e tem sua geração relacionada às incertezas das cargas, às perdas, ao critério de despacho e às taxas de saída forçada das máquinas. Há ainda aspectos relacionados com a hidrologia que não serão

abordados neste trabalho. Com base nesta divisão, algumas simplificações foram feitas (14) para aumentar a eficiência do processo de simulação da equação de balanço, como será visto a seguir.

2.4. BALANÇO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS MULTI-ÁREAS

A simulação da equação de balanço de potência do sistema é um ponto chave no algoritmo de FPP. Conforme citado anteriormente, este balanço é feito através de uma política ou critério de despacho que distribui a carga pelas unidades geradoras disponíveis no sistema. Desta forma, diferentes critérios de despacho implicarão em diferentes distribuições de fluxo pela rede e, conseqüentemente, proporcionarão diferentes solicitações dos equipamentos de transmissão.

Conforme descrito anteriormente, a geração total do sistema pode ser dividida em duas parcelas: unidades dependentes e independentes. A equação de balanço de potência pode então ser descrita da seguinte forma, suprimindo-se os índices i e k para simplificar:

$$Y G_{ind} + Y G_{dep} = D + Perdas \quad (2.6)$$

A equação (2.6) mostra que, sendo definidos os valores de carga, de perdas e de gerações independentes, a potência a ser distribuída pelas estações dependentes fica também definida. Na referência 14 foi estabelecida uma política de despacho que utiliza uma distribuição de carga pelas usinas baseadas em percentuais pré-estabelecidos, coerentes com a operação energética dos reservatórios.

No caso do sistema interligado brasileiro, existem áreas

de controle que, em princípio, devem satisfazer seus próprios requisitos de demanda. Assim, para cada área "a" existirá uma equação de balanço do tipo:

$$Y_G^a = D^a + \text{Perdas}^a + \Delta P^a \quad (2.7)$$

A parcela ΔP^a colocada nesta equação se refere a quantidade de potência exportada ou importada de outras áreas para satisfazer o balanço global de potência do sistema. Dentro de cada área "a" existirão unidades geradoras dependentes que são responsáveis pelo fechamento da ponta da área. Desta forma, dentro de uma mesma área os geradores dependentes participam com percentuais pré-estabelecidos para fechar o balanço de potência.

Quando uma determinada área "a" não for capaz de suprir suas próprias necessidades de carga (i.e., $\Delta P^a < 0$), ela deverá buscar ajuda nas demais áreas que tenham potência disponível, segundo uma ordem de prioridades pré-estabelecida. Deste modo, o critério de despacho fica totalmente definido.

2.5. O ALGORITMO DE FPP

2.5.1. Determinação do Ponto de Linearização

O algoritmo de FPP avalia as grandezas da rede, através de SMC, utilizando as equações (2.3) e (2.2). Para tal é necessário se determinar o ponto de linearização Y_1 .

O melhor ponto de linearização num problema de FPP é conseguido através de um fluxo de potência convencional quando o valor esperado do vetor aleatório de entrada Y é usado. O vetor Y é constituído pelas cargas ativas e reativas, gerações

independentes e dependentes. Os valores esperados das cargas ativas, reativas e das gerações independentes são definidos pelos dados de entrada. O mesmo não acontece com as gerações dependentes devido a dependência não-linear introduzida pela equação de balanço.

A maior dificuldade é que não se sabe a priori o valor esperado da potência gerada pelas unidades geradoras dependentes. Portanto, o seguinte procedimento é utilizado: em primeiro lugar, obtém-se a função densidade de probabilidade da carga total D^a , de cada área do sistema, através de convolução das diversas cargas pertencentes a estas áreas. Sorteia-se então os valores de carga $D^a(k)$. Utilizando a equação (2.7) de balanço de potência por área, determina-se, a partir das capacidades de geração disponíveis neste sorteio e da política de despacho, os valores gerados em cada unidade/estação geradora. Este processo se repete até que o número total de sorteios seja atingido. Durante este processo, é avaliado o valor médio de $Y(k)$, definindo assim o ponto de linearização Y_1 .

2.5.2. Cálculo das Grandezas

Um fluxo de potência convencional é avaliado para se obter os valores de $X = X_1$, procedendo-se em seguida a montagem da equação (2.3). O processo de simulação é repetido para se resgatar o mesmo conjunto de pontos $Y(k)$ utilizados anteriormente na determinação do ponto de linearização Y_1 . Observe que as sementes dos números pseudo-aleatórios que geram estes pontos já foram identificadas no passo anterior. Finalmente, cada ponto $Y(k)$ é transformado em $X(k)$ e $Z(k)$,

pelas equações (2.3) e (2.2) respectivamente.

Note que, durante a simulação da equação de balanço de potência (2.7), o valor das Perdas não é conhecido. Para minimizar este problema, o seguinte procedimento é usado. Na primeira simulação desta equação é assumido um valor constante de perdas ativas, baseado num percentual pré-especificado do valor esperado da carga total. Como foi visto, acessa-se os resultados de um FPC e tem-se um valor médio de perdas para cada área do sistema. Refaz-se então a SMC utilizando tais valores de perdas, e obtém-se o novo valor do ponto de linearização. Este processo pode ser repetido até a convergência dos valores de perdas. Em geral, uma segunda simulação da equação de balanço tem-se mostrado suficiente.

2.5.3. Fluxograma Simplificado

Considere o fluxograma simplificado do algoritmo FPP mostrado na Fig. 2.1. No bloco 1 são lidos os dados usuais de um programa de FPC e os dados probabilísticos de carga e geração. No segundo bloco é feita então uma simulação da equação de balanço de potência do sistema, considerando: as indisponibilidades das unidades geradoras, as incertezas nas cargas e a política de despacho especificada. Determina-se nesta etapa os valores médios de injeção de potência ativa e reativa que serão utilizados pelo algoritmo de FPC, para a obtenção do vetor de estado (ângulo e magnitude das tensões nodais complexas) correspondente. A seta com sentido duplo indica que o processo anterior pode ser repetido devido ao desconhecimento a priori das perdas do sistema.

Com a obtenção do ponto de linearização, o próximo passo é a avaliação das funções de densidade do vetor de estado X e Z através de SMC utilizando as equações (2.3) e (2.2) respectivamente. Observe que esta simulação é bastante eficiente do ponto de vista computacional pois são avaliados de forma relativamente precisa um número muito grande de fluxos de potência (5.000, 10.000, etc.), sem que haja os eventuais problemas de divergência do algoritmo FPC. Finalmente, no bloco 4 são impressas as grandezas de interesse.

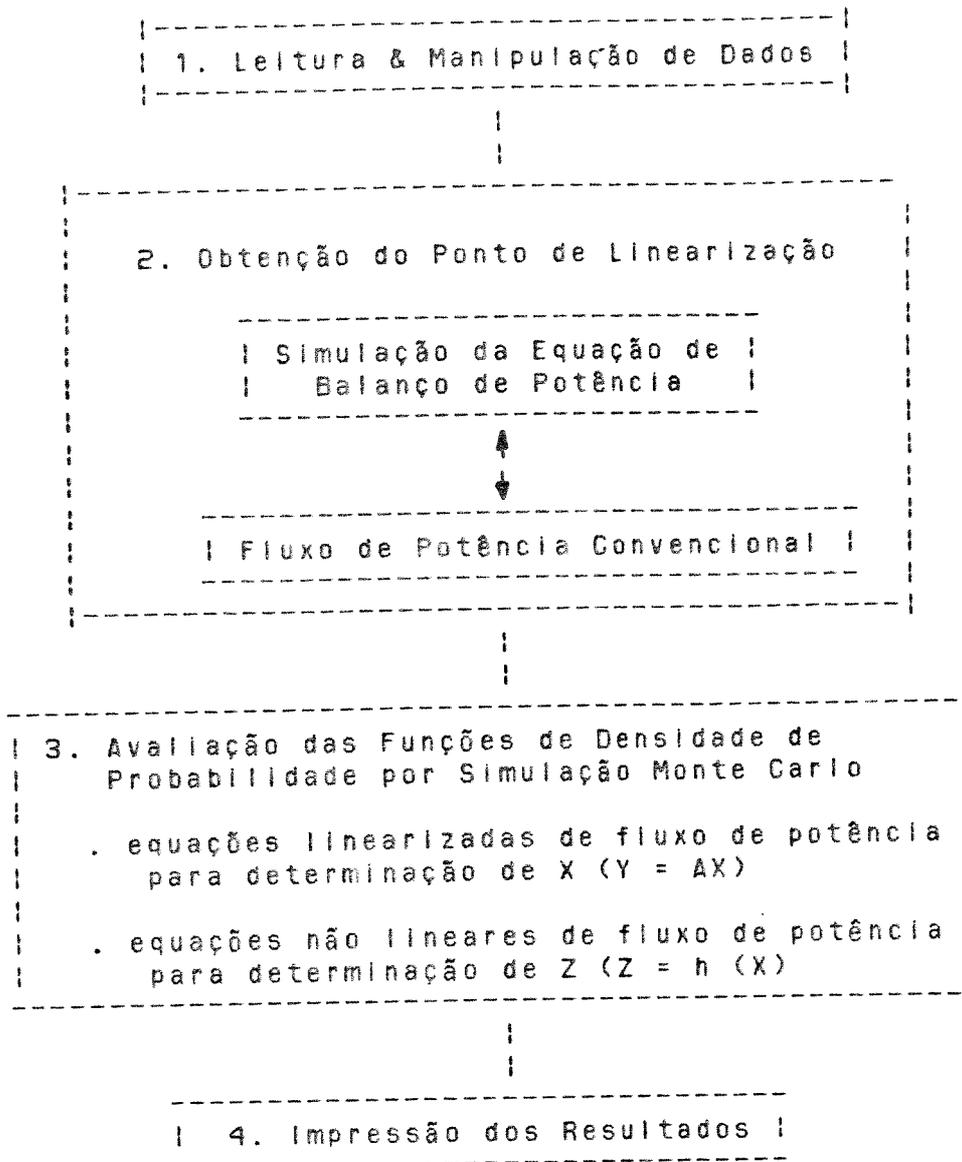


FIG. 2.1 - Fluxograma simplificado do algoritmo de FPP

2.6. CONCLUSÕES

O algoritmo apresentado neste capítulo, bastante similar ao disponível hoje para os usuários do setor elétrico brasileiro, responde de forma consistente aos principais requisitos de modelagem:

- utiliza um modelo AC linear, que, dentro de certos limites de precisão, avalia o desempenho da rede, acessando grandezas ativas e reativas;
- considera as incertezas nas cargas com qualquer distribuição e suas possíveis correlações;
- simula possíveis perdas de unidades geradoras;
- incorpora uma função de despacho de potência multi-área.

A formulação anteriormente descrita possui algumas restrições inerentes ao método, como por exemplo, a precisão do algoritmo para as grandezas reativas, quando o nível de incerteza nas cargas é um pouco mais elevado. Há ainda outros aspectos relativos a modelagem que precisam ser abordados e aperfeiçoados tais como: a incerteza na topologia da rede, a implantação de novas estratégias de despacho e a modelagem da variação dos limites de reativo nas barras de tensão controlada, quando há perda de unidades geradoras. No que diz respeito a incertezas da topologia da rede, existem algumas proposições feitas neste sentido, inclusive implementadas em modelo similar de FPP [23]. A superação das outras restrições vem sendo estudadas em investigações atuais.

É importante destacar que estas restrições, entretanto,

não impedem que a aplicação do método descrito alcance resultados bastante satisfatórios, quando aplicados a sistemas reais de grande porte: conforme será demonstrado no Capítulo 4.

O algoritmo apresentado neste capítulo será revisado no Capítulo 3, visando incorporar uma modelagem mais realística da carga incluindo a representação das incertezas associadas a previsão do mercado de longo prazo.