ENSAIOS DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM MEDIDAS IMPRECISAS

Vladimiro Miranda Jorge Pereira
INESC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores
FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Praça da República, 93 - 4000 Porto, PORTUGAL
tel: 351.2.2094230; fax: 351.2.2084172; email: vmiranda@inescn.pt

RESUMO

Neste artigo são apresentados os resultados de ensaios com uma nova metodologia de estimação de estado num Sistema Eléctrico de Energia, em que alguns dos valores de base são representados por números imprecisos (*fuzzy numbers*), operados com base na teoria dos conjuntos imprecisos (*fuzzy sets*). Esta metodologia é concebida para aplicação especial a redes de distribuição. No artigo discute-se, em particular, a influência de algumas medidas afectadas de imprecisão qualitativa num processo de estimação de estado clássico, baseado numa abordagem de mínimos quadrados. Os argumentos serão ilustrados com alguns exemplos numéricos de carácter didáctico.

1. INTRODUÇÃO

Nos modernos Sistemas Gestores de Energia (EMS - *Energy Management System*) o programa de Estimação de Estado processa um conjunto de dados de medidas e de dados da rede e dá em tempo real uma solução do fluxo de cargas, a qual é a base para as funções que monitorizam a segurança do sistema e fazem o seu controlo. A Estimação de Estado é baseada em relações matemáticas entre as variáveis de estado do sistema (ângulos e módulos das tensões nos barramentos) e as medidas. As grandezas mais usadas para medidas são as potências injectadas nos barramentos, os fluxos de potências e de intensidades de correntes nas linhas, e os módulos das tensões nos barramentos. Além da solução do fluxo de cargas em tempo real o estimador de estado tem também, entre outras, funções para detecção de dados incoerentes em medidas, colocação de pontos de medição e testes de observabilidade.

O método apresentado aplica-se sobretudo às redes de distribuição, pois não é apenas o tipo de medidas que habitualmente se recolhem que é diferente das medidas recolhidas nos sistemas de produção/transporte (por exemplo, na distribuição é muito mais frequente encontrarem-se medidas de intensidade de corrente) mas também, em muitos casos, para largos sectores das redes de distribuição não existem mesmo medidas, por não instalação de equipamento. Assim, parece ser de todo o interesse conceber processos de conjugar medidas efectivamente recolhidas, em centros de despacho de distribuição com SCADA, com informações de carácter qualitativo (medidas imprecisas) sobre o comportamento dos consumidores.

A Estimação de Estado pode ter duas interpretações: uma que é a mais geral e que engloba todo o processo (algoritmo que dá a solução do fluxo de cargas, detecção de dados incoerentes em medidas, testes de obervabilidade, ...); e a outra engloba apenas o algoritmo que dá a solução do fluxo de cargas. Neste artigo apenas se trata a Estimação de Estado na segunda interpretação, atendendo ao facto de que se pretende calcular as variáveis de estado quando há medidas imprecisas.

Neste artigo começa-se por apresentar uma caracterização dos conjuntos imprecisos. No ponto 3 apresenta-se o algoritmo de estimação de estado baseado no método dos mínimos quadrados resolvido pelo método de Newton-Raphson (Método de Equações Normais), e no ponto seguinte altera-se este método para englobar também medidas definidas de um modo qualitativo, discutindo-se o processo de cálculo dos fluxos de potência e de intensidades de correntes. No ponto 5 apresentam-se alguns exemplos de aplicação e discutem-se os resultados obtidos.

2. CONJUNTOS IMPRECISOS

Para se representar em termos matemáticos afirmações que são usadas no dia a dia, e em particular as usadas para descrever situações de um sistema eléctrico, como:

- "A carga neste sector da rede é de, aproximadamente, 20 MW";
- "O fluxo de potência activa da linha que fornece esta zona é cerca de 15 MW";
- "A potência produzida por uma central eólica é no máximo 5 MW e verifica-se que em geral produz entre os valores de 2 MW e 4 MW".

Vão-se definir os conjuntos imprecisos (*fuzzy sets*) que permitem representar este tipo de dados qualitativos.

Um conjunto é uma colecção de elementos de um determinado universo que satisfazem determinadas propriedades. O modo como cada elemento satisfaz as propriedades é que determina o tipo de conjunto, dado um universo X e um conjunto A subconjunto de X, define-se a função de pertença $p_A(x)$ que para cada elemento x tomará um valor que é o grau de pertença do elemento x ao conjunto A, e esse valor será:

- <u>0 ou 1</u>, se o conjunto A for <u>determinístico</u>;
- <u>entre 0 e 1</u>, se o conjunto A for <u>impreciso e normalizado</u>.

Um conjunto impreciso Ã é pois caracterizado por uma função de pertença $p_{\tilde{A}}(x)$ (função de distribuição de possibilidade, sob certas condições) que para cada elemento x do universo considerado associa-lhe o seu grau de pertença a Ã:

$$\tilde{A} = \left\{ \left(x, p_{\tilde{A}}(x) \right) x \in X \right\}$$

Tal como para os conjuntos determinísticos existe um conjunto de definições e operações associado existe também para os conjuntos imprecisos [3,4], havendo diferenças substanciais entre os dois tipos.

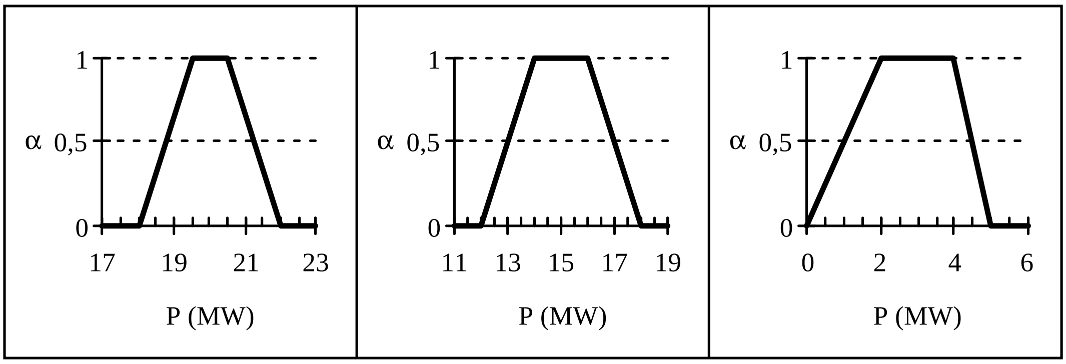

Figura 1: representação gráfica de 3 funções de pertença de conjuntos imprecisos

Para os exemplos de afirmações qualitativas, e considerando que as funções de pertença têm gráficos trapezoidais, apresentam-se na figura 1 um exemplo para os gráficos das funções de pertença para cada um deles.

3. MÉTODO DE EQUAÇÕES NORMAIS

Na Estimação de Estado o modelo usado para relacionar as medidas e as variáveis de estado é:

$$Z = h (X) + e \qquad (1)$$

onde: Z é o vector das medidas (mx1);
X é o vector de estado (nx1);

h(.) é o vector das funções não lineares que relacionam as medidas com o estado do sistema (mx1);

e é o vector dos erros nas medidas (mx1);

m é o número de medidas;

n é o número de variáveis de estado.

Geralmente escolhem-se as tensões nos barramentos para variáveis de estado. As tensões nos barramentos podem ser representadas na forma polar (módulo e fase) ou na forma rectangular (parte real e parte imaginária). Considera-se que o vector e possui distribuição Gaussiana (Normal) com média 0 e covariância R.

O que se pretende com a estimação de estado é calcular o vector de estado X de modo a minimizar e, e para isso o método de equações normais usa o método dos mínimos quadrados para formular o problema. Se R^{-1} é uma matriz quadrada diagonal (mxm) em que os elementos da diagonal são os pesos atribuídos às medidas (às pseudo-medidas, medidas geradas a partir de valores históricos, são-lhe atribuídos pesos pequenos), então o método dos mínimos quadrados equaciona o problema da estimação de estado na seguinte forma:

$$\text{MINIMIZAR } [Z - h(X)]^T R^{-1} [Z - h(X)] \tag{2}$$

Utilizando-se o método de Newton-Raphson para calcular o valor de X que iguala a zero a derivada da expressão em (2), obtém-se o seguinte processo iterativo:

$$\left(\left(H^k\right)^T R^{-1} \left(H^k\right) \right) \Delta X^k = \left(H^k\right)^T R^{-1} \left[Z - h(X^k) \right] \tag{3}$$

em que H é a matriz do Jacobiano de h(X). E para a iteração de ordem k do método calcula-se o vector de desvios DX^k do vector de estado X^k, sendo de seguida calculado um novo vector de estado ($X^{k+1} = X^k + DX^k$) e repete-se o processo. Os cálculos prosseguem até a norma do vector de desvios ser inferior a uma determinada tolerância.

A matriz $G = H^T R^{-1} H$ é geralmente designada por **matriz do ganho**. Em cada iteração do cálculo DX a matriz do ganho é invertida. Tanto a matriz do Jacobiano como a matriz do ganho são matrizes esparsas sendo portanto bastante vantajoso usar técnicas de esparsidade para guardá-las [5].

4. ESTIMAÇÃO DE ESTADO COM MEDIDAS IMPRECISAS

Para que a estimação do estado de um sistema de distribuição, em que algumas medidas não são determinísticas mas são descritas por um conjunto impreciso (medidas imprecisas), seja feita de um modo eficiente e seja possível aplicar os conceitos de conjuntos imprecisos, há que considerar linearizações nas funções h(X). Os resultados da linearização são tanto mais próximos dos reais quanto o ponto escolhido para a linearização for mais próximo de pontos de cálculo futuro. Deste modo, a primeira fase do método de estimação de estado com medidas imprecisas vai calcular o estado do sistema só com medidas determinísticas. Nesta fase, para as medidas imprecisas considera-se uma medida determinística equivalente que é o ponto médio dos valores em que a função de pertença vale 1 (valor central).

Sendo a primeira fase da estimação de estado com medidas imprecisas resolvida pelo método de equações normais, no fim do processo iterativo obtém-se o vector de estado X1 e da última iteração do método iterativo (3) obtém-se a matriz ($G^{-1} H^T R^{-1}$). De seguida calcula-se:

$$\Delta Z' = Z' - h(X1) \tag{4}$$

onde: Z' é o vector das medidas imprecisas;

DZ' é o vector de desvios entre as medidas imprecisas e o valor de h(X1);

X1 é o vector de estado calculado na primeira fase do método;

Considerando a linearização do vector de funções h(X) em torno do ponto X1, obtém-se a equação que permite calcular incrementos imprecisos para o vector de estado X1 e consequentemente o vector de estado impreciso X':

$$\Delta X' = (G^{-1}H^{T}R^{-1})\Delta Z' \qquad (5)$$
$$X' = X1 + \Delta X'$$

onde: DX' é o vector impreciso de incrementos para o vector de estado X1;

X' é o vector de estado impreciso solução do problema de estimação de estado com medidas imprecisas;

$G = H^{T}R^{-1}H$ é a matriz do ganho calculada na última iteração do método de equações normais;

H é a matriz do Jacobiano de h(X) calculada na última iteração do método de equações normais.

As equações (5) constituem um processo para calcular o vector de estado impreciso a partir de desvios imprecisos das medidas e do vector de estado calculado anteriormente pelo método das equações normais.

Depois de definido o processo de cálculo do vector de estado, interessa agora definir um processo de cálculo para os fluxos de potências e intensidades de correntes. Calcular directamente a partir do vector de estado impreciso não é a forma mais correcta, pois as equações dos fluxos não são lineares, e o vector de estado já foi calculado considerando uma linearização. O processo mais correcto será calcular os fluxos directamente a partir das medidas; para isso, vai-se considerar a linearização das equações dos fluxos em torno do ponto X1 (vector de estado calculado pelo método de equações normais) usando o desenvolvimento em série de Taylor. Considera-se que o vector de estado é definido na forma polar:

$$\Delta P_{ij} \cong \left.\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i}\right|_{X1} \Delta\theta_i + \left.\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j}\right|_{X1} \Delta\theta_j + \left.\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i}\right|_{X1} \Delta V_i + \left.\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j}\right|_{X1} \Delta V_j \qquad (6.1)$$

$$\Delta Q_{ij} \cong \left.\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i}\right|_{X1} \Delta\theta_i + \left.\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j}\right|_{X1} \Delta\theta_j + \left.\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i}\right|_{X1} \Delta V_i + \left.\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j}\right|_{X1} \Delta V_j \qquad (6.2)$$

$$\Delta |I_{ij}| \cong \left.\frac{\partial |I_{ij}|}{\partial \theta_i}\right|_{X1} \Delta\theta_i + \left.\frac{\partial |I_{ij}|}{\partial \theta_j}\right|_{X1} \Delta\theta_j + \left.\frac{\partial |I_{ij}|}{\partial V_i}\right|_{X1} \Delta V_i + \left.\frac{\partial |I_{ij}|}{\partial V_j}\right|_{X1} \Delta V_j \qquad (6.3)$$

onde: P_{ij} é o fluxo de potência activa entre o barramento i e o j;

Q_{ij} é o fluxo de potência reactiva entre o barramento i e o j;

$|I_{ij}|$ é o módulo da intensidade da corrente entre o barramento i e o j;

V_i, V_j é o módulo da tensão nos barramentos i e j, respectivamente;

q_i, q_j é a argumento (fase) da tensão nos barramentos i e j, respectivamente.

Definindo a matriz $J_{FL}(X1)$ das derivadas do fluxo de potência activa e reactiva e da intensidade da corrente, em relação a cada componente do vector de estado, calculada no ponto X1, e definindo o vector DFL dos desvios dos fluxos do seguinte modo:

$$J_{FL}(X) = \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_k}\right|_X & \left.\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_k}\right|_X \\ \left.\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_k}\right|_X & \left.\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_k}\right|_X \end{bmatrix} \qquad DFL = \begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \left.\dfrac{\partial |I_{ij}|}{\partial \theta_k}\right|_X & \left.\dfrac{\partial |I_{ij}|}{\partial V_k}\right|_X \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \Delta |I_{ij}| \end{bmatrix}$$

As equações (6) escrevem-se na seguinte forma matricial

$$DFL = J_{FL}(X1) \,.\, DX \qquad (7)$$

O cálculo dos fluxos imprecisos obtém-se usando as equações:

$$\begin{aligned} \Delta FL &= \left(J_{FL}(X1)\left(G^{-1}H^{T}R^{-1}\right)\right)\Delta Z' \\ FL &= FL(X1) + \Delta FL \end{aligned} \qquad (8)$$

onde: - FL é o vector dos fluxos de potências e intensidades de correntes imprecisos para um vector de medidas imprecisas Z'

- ΔFL é o vector dos acréscimos aos fluxos de potências e intensidades de correntes imprecisos para um vector de desvios das medidas imprecisas DZ';
- FL(X1) é o vector dos fluxos de potências e intensidades de correntes determinísticos calculados a partir do vector de estado resultante do método de equações normais.

As equações (8) são um processo para calcular os fluxos de potências e intensidades de correntes imprecisos a partir de desvios imprecisos das medidas e do vector de estado calculado anteriormente pelo método das equações normais. Quando o valor do módulo da intensidade da corrente for próximo de zero, ao considerar-se a linearização poderão aparecer valores negativos com um grau de pertença maior que 0, o que não tem significado atendendo ao facto de se tratar de um módulo (sempre maior do que zero).

Para evitar que apareçam módulos negativos faz-se o cálculo, por um processo semelhante ao (8), da parte real e imaginária da intensidade da corrente, e quando há troca de sinais ou na parte real ou na parte imaginária calcula-se, a zona onde ocorre a troca de sinal, o módulo da intensidade da corrente a partir da parte real e da parte imaginária.

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Para o primeiro exemplo vai utilizar-se uma rede muito simples, apenas com 2 barramentos e uma linha, para ser mais fácil a observação dos resultados da estimação de estado com medidas imprecisas. Na figura 2 é apresentado um esquema simplificado desta primeira rede de teste, estando nela indicados os pontos e os tipos das medidas.

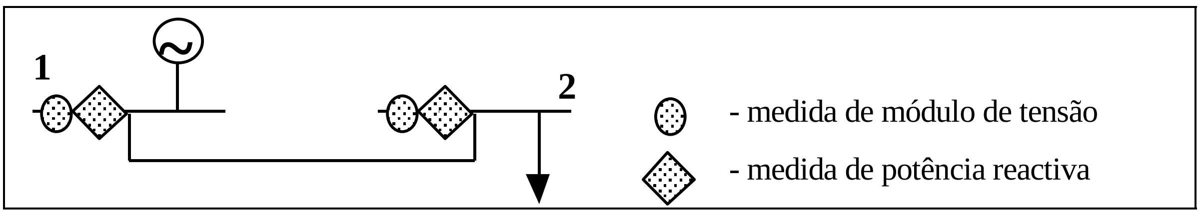

Figura 2: esquema simplificado de uma rede de teste com 2 barramentos e 4 medidores.

Os valores utilizados para as medidas são:

- potência reactiva injectada no barramento 1 (Q1) = 4.45 p.u.;
- potência reactiva injectada no barramento 2 (Q2) = -4.0 p.u.;
- módulo da tensão no barramento 1 (V1) = 1.015 p.u.;
- módulo da tensão no barramento 2 (V2) = 0.97 p.u..

Além destas medidas foi também usada a seguinte informação qualitativa:

- "O fluxo de potência activa na linha 1-2 é quase certo entre os valores 6 e 6.1 p.u., mas existe uma possibilidade de ser entre 5.5 e 6.6 p.u.".

Esta informação é representada como um número impreciso de forma trapezoidal, com os vértices (5.5,0), (6,1), (6.1,1) e (6.6,0). Para calcular o vector de estado determinístico pelo método das equações normais considerou-se a medida do fluxo de potência activa na linha 1-2 igual a 6.05.

Na figura 3 apresentam-se os gráficos das distribuições de possibilidade das componentes do vector de estado (módulo (V1 e V2) e fase (q2) da tensão em cada barramento) impreciso, calculadas pelo método descrito neste artigo.

Na figura 4 apresentam-se os gráficos das distribuições de possibilidade dos fluxos de potência activa (P12), de potência reactiva (Q12) e do módulo da intensidade da corrente (|I12|). Neste caso, o cálculo do módulo da intensidade da corrente é directo a partir das equações 8, pois o resultado é um número impreciso que tem uma possibilidade maior do que zero entre 7.04 e 7.78 (valores válidos para o módulo da intensidade da corrente).

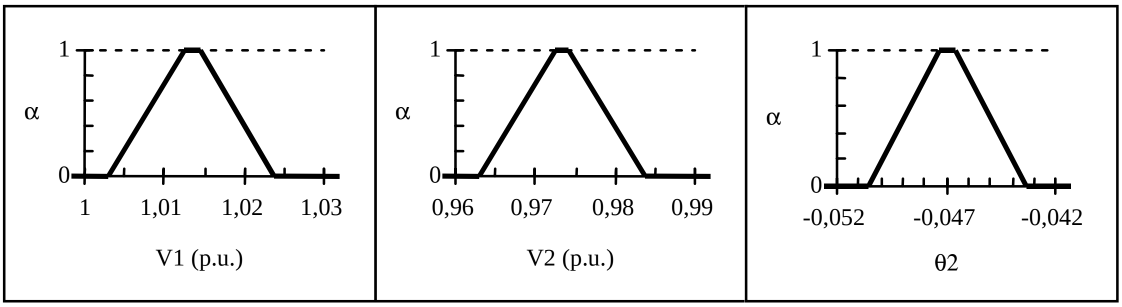

Figura 3: gráficos das componentes imprecisas do vector de estado.

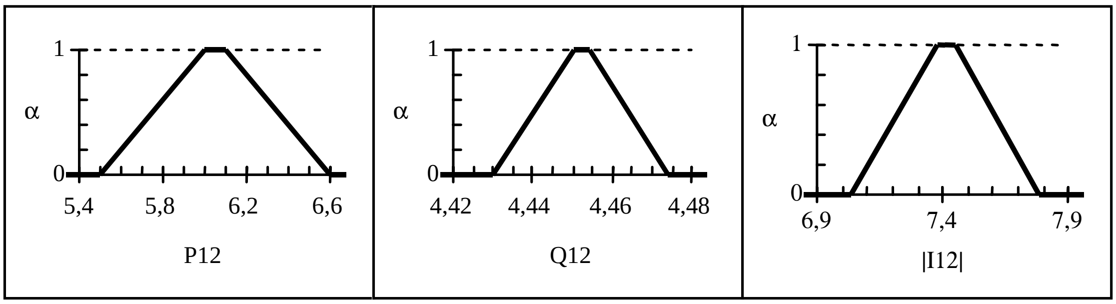

Figura 4: gráficos dos fluxos de potências e do módulo de intensidade de corrente imprecisos.

No exemplo anterior não houve necessidade de modificar o modo de cálculo do módulo da intensidade da corrente, pois com o cálculo directo obteve-se um resultado com significado. No próximo exemplo considera-se um sistema de medidas e com os valores das medidas de tal modo que o valor do módulo da intensidade da corrente seja um valor próximo de zero. Deste modo, para o exemplo vai considerar-se novamente a rede com 2 barramentos e uma linha, mas considera-se o sistema de medidas que se apresenta na figura 5.

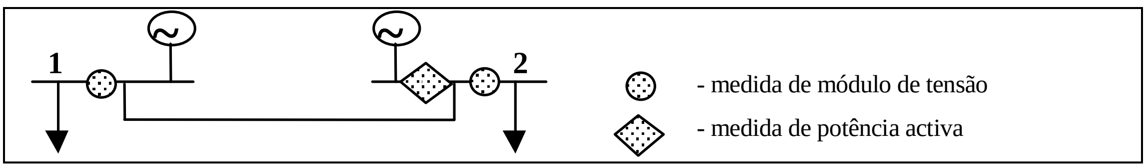

Figura 5: esquema simplificado de uma rede de teste com 2 barramentos e 3 medidores.

Os valores utilizados para as medidas são:

- potência activa injectada no barramento 2 (Q2) = -0.5 p.u.;
- módulo da tensão no barramento 1 (V1) = 1.0 p.u.;
- módulo da tensão no barramento 2 (V2) = 1.02 p.u..

Além destas medidas foi também usada a seguinte informação qualitativa:

- "A potência reactiva injectada no barramento 2 é um valor quase certo entre 0.5 e 0.9 p.u., mas existe uma possibilidade de ser entre -0.5 e .1.0 p.u.".

Esta informação é representada como um número impreciso de forma trapezoidal, com os vértices (-0.5,0), (0.5,1), (0.9,1) e (1,0). Para calcular o vector de estado determinístico pelo método das equações normais considerou-se a medida da potência reactiva injectada no barramento 2 igual a 0.7.

Na figura 6 apresentam-se os gráficos das distribuições de possibilidade das componentes do vector de estado impreciso. Na figura 7 apresentam-se os gráficos das distribuições de possibilidade dos fluxos de potência activa, de potência reactiva e do módulo da intensidade da corrente (calculado directamente).

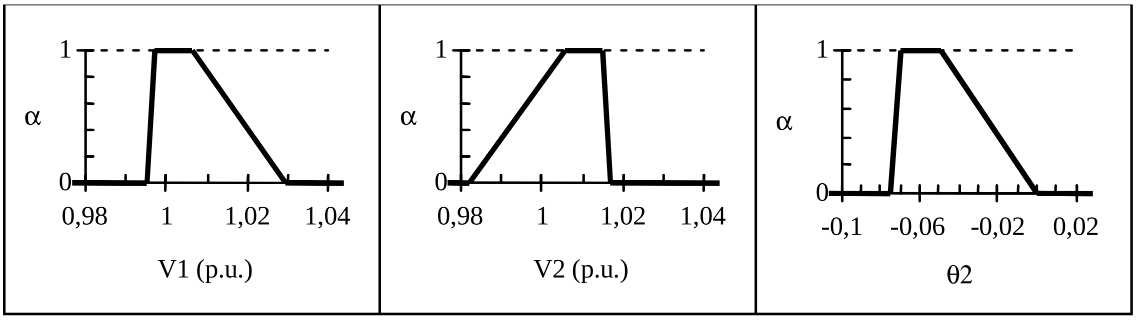

Figura 6: gráficos das componentes imprecisas do vector de estado.

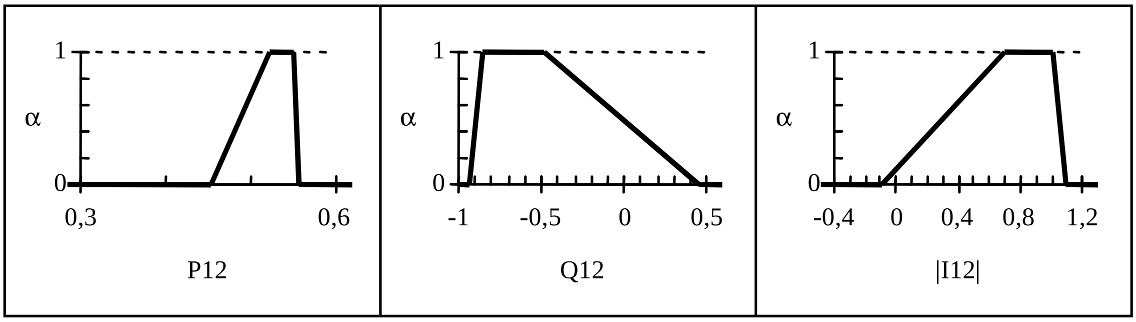

Figura 7: gráficos dos fluxos de potências e módulo de intensidade de corrente imprecisos.

Neste caso, no cálculo do módulo da intensidade da corrente tem de usar-se o processo referido no ponto anterior, pois o resultado obtido directamente é um número impreciso que tem uma possibilidade maior do que zero entre -0.09 e 1.09, ou seja valores negativos para o módulo da intensidade da corrente com possibilidade positiva.

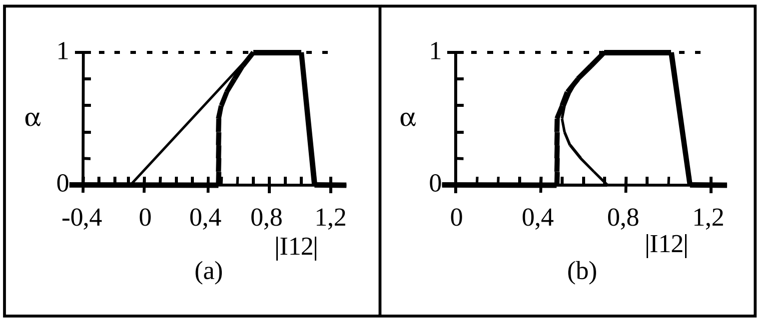

Figura 8: gráficos das aproximações ao módulo de intensidade de corrente impreciso.

Na figura 8-(a) apresenta-se o resultado do módulo da intensidade da corrente obtido pelo processo descrito no ponto anterior (a grosso na figura) comparado com o resultado impossível que se obteve por cálculo directo. Na figura 8-(b) compara-se esse resultado (novamente a grosso na figura) com o módulo de intensidade da corrente calculado por múltiplas estimações de estado determinísticas em que o valor da medida Q2 ia variando de -0.5 a 0.5 (com um incremento de 0.1), 0.9 e finalmente 1.0. Atendendo a que o valor da função de pertença de um ponto com vários valores de pertença possíveis é o máximo desses valores, o resultado que se obteve para o módulo de intensidade da corrente, pelo processo descrito no ponto anterior do artigo, é muito aproximado do real, tendo-se obtido com pouco esforço de cálculo.

6. CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado tem uma importância prática relevante.

Na medida em que os centros de decisão e despacho de redes de distribuição se vão equipando com sistemas do tipo EMS - *Energy Management System* (também por vezes designados por DMS - *Distribution Management System*), avoluma-se a necessidade de Estimadores de Estado que possam trabalhar com informação qualitativa, dada a ausência tradicional de monitorização em larga escala das grandezas eléctricas nas redes de distribuição e o elevadissimo encargo financeiro que tal política exigiria.

Este trabalho vem demonstrar que, pelo menos, há uma via aberta de pesquisa para a implementação de tal nova geração de Estimadores de Estado na distribuição.

7. REFERÊNCIAS

[1] Miranda, V., Matos, M., Saraiva, J.T., "Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation", 10th PSCC, 1990, Graz, Austria.

[2] Lu, C.N., Teng, J.H., Liu, W.-H.E., "Distribution System State Estimation", Proceeding of IEEE/PES 1994 Winter Meeting, New York, Jan. 1994.

[3] Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility", *Fuzzy Sets and Systems*, nº1, 1978.

[4] Zimmermann, H.-J., "Fuzzy Set Theory and Its Applications", Kluwer-Nijhoff Publishing, Boston, 1984.

[5] Brameller, A. e Allan, R. N. e Hamam, Y. M., "Sparsity", Pitman Ltd, 1976.