

ESTIMAÇÃO DE ESTADO UTILIZANDO DADOS IMPRECISOS - UMA ABORDAGEM ÚTIL PARA SISTEMAS DE DMS

Jorge Pereira
Fac. Economia U. Porto e INESC
Praça República, 93,
4050 Porto, Portugal.
email: jpereira@duque.inescn.pt

João Tomé Saraiva
Fac. Engenharia U. Porto- DEEC e INESC
Telef. +351.2.2094230
Fax: +351.2.2084172
email: jsaraiva@porto.inescn.pt

Vladimiro Miranda
INESC Macau e Univ. Macau
Taipa, Macau.
Fax: +853.831694
email: vmiranda@umac.mo

RESUMO

Os algoritmos de estimação de estado são utilizados com grande frequência nos centros de exploração de redes de transporte de energia. Ao nível da distribuição, a utilização desta metodologia tem vindo a deparar com diversas dificuldades de entre as quais se salienta a ausência, em extensas zonas das redes, de valores de medidas conhecidas em tempo real. Por forma a ultrapassar este problema descreve-se, neste artigo, um algoritmo de estimação de estado que permite integrar dados representados por números imprecisos fornecidos por peritos tendo em conta o seu conhecimento e experiência das condições de funcionamento das redes, ou obtidos a partir de algoritmos de classificação de cargas. Atendendo às características particulares das redes de distribuição o algoritmo referido é estendido por forma a permitir especificar valores imprecisos do módulo de intensidades de corrente. Como resultados, obtêm-se números imprecisos para representar os valores possíveis das grandezas a estimar. Na parte final do artigo é apresentado um exemplo de aplicação utilizando uma versão adaptada de uma rede de distribuição em média tensão portuguesa.

Palavras chave - Estimação de Estado, DMS, Conjuntos Imprecisos, *Fuzzy Sets*.

1. INTRODUÇÃO

A crescente dependência das sociedades modernas em relação a diversas formas de energia e à energia eléctrica em particular, tem obrigado a que exista um cuidado acrescido na realização de acções de planeamento propriamente dito, planeamento da exploração e exploração dos sistemas eléctricos de energia. No que diz respeito à exploração podemos hoje constatar a existência de centros de condução e controlo das redes de transporte e dos sistemas produtores em que, entre outras tarefas, é monitorizado o estado do sistema em tempo real. Estas preocupações têm vindo, mais recentemente, a atingir também as redes de distribuição de energia. Com efeito, tem-se verificado que é ao nível das redes de distribuição de energia que é possível conseguir melhorias significativas da qualidade de serviço oferecido aos clientes e, por outro lado, a ligação de um número significativo de produtores independentes às redes de Média Tensão tem vindo a justificar elevados investimentos na automatização, telecomando e telemetragem destas redes.

Para além destes aspectos genéricos, os sistemas de energia têm vindo a ser confrontados com novos desafios decorrentes, nomeadamente, da criação de um ambiente competitivo que levará ao aparecimento de um mercado da energia eléctrica. Este novo ambiente, que se antevê para um futuro não muito longínquo, acarreta novas incertezas e levará a que as redes sejam exploradas em situações mais extremas que justificam, só por si, a necessidade de monitorizar as condições de funcionamento dos sistemas.

Em resposta a estas preocupações e utilizando diversos desenvolvimentos tecnológicos (tais como a diminuição dos custos de hardware, diminuição dos custos de automação e a disponibilização de poderosos sistemas de tratamento e armazenamento de informação) temos vindo a assistir à migração do conceito de EMS - *Energy Management System* - para as redes de distribuição dando origem aos DMS - *Distribution Management Systems*.

De uma forma genérica os DMS deverão possuir, entre outras, as seguintes características:

- possibilitar o tratamento de grandes quantidades de informação de diversos tipos;
- integração das funções dos actuais sistemas SCADA;
- realização de cálculos básicos de análise de redes (previsões de cargas a nível da distribuição, fluxos de potências e análise de curto-circuitos);
- optimização da operação em termos de controlo de tensão e potência activa de perdas;
- disponibilização de funções de planeamento;

- integração de funções que permitam assistir o operador, de forma mais ou menos automática, na realização de acções de *switching* e face à ocorrência de defeitos (isolamento de defeitos e reposição de serviço);
- realização de estudos de fiabilidade e preparação de elementos de natureza estatística;
- realização de estudos de estimação de estado.

O algoritmos de estimação de estado [1] são constituintes básicos dos EMS já referidos devendo também integrar os sistemas DMS dado que, a partir de dados telemetrados e de entradas digitais, é necessário avaliar o valor de um conjunto de variáveis - variáveis de estado - que melhor os explicam. A utilização dos algoritmos de estimação de estado tradicionais nas redes de distribuição apresenta, no entanto, alguns problemas dado que:

- as redes a monitorizar apresentam dimensões muito elevadas;
- a topologia dessas redes altera-se com grande frequência;
- e, principalmente, é corrente existir um pequeno número de medidas telemetradas além de que diversas destas medidas correspondem a intensidades de corrente.

Tendo em conta estas preocupações, em [2] é apresentado um algoritmo de estimação de estado aplicado a redes de distribuição de energia. Neste algoritmo todas as medidas disponíveis são convertidas em medidas de intensidade de corrente. A existência de poucas medidas telemetradas pode ser compensado, ao nível das redes de distribuição, pela integração de declarações linguísticas fornecidas por peritos e traduzidas por conceitos da teoria dos conjuntos imprecisos [3, 4]. Em [5, 6] foi apresentado um algoritmo de Estimação de Estado permitindo obter descrições imprecisas das variáveis de estado e de trânsitos de potências e de intensidades de corrente especificando descrições imprecisas de diversas potências activas e reactivas e módulos de tensão. Conceitos desta teoria têm sido aplicados com sucesso noutras áreas dos sistemas de energia. Assim, em [7-10] são apresentados algoritmos de fluxo de potências, de fluxo de potências óptimo, e de avaliação de fiabilidade integrando dados imprecisos.

Neste artigo o algoritmo apresentado em [5] é adaptado por forma a ser possível especificar medidas de intensidade de corrente representadas por números imprecisos. O algoritmo desenvolvido será testado utilizando uma rede eléctrica em média tensão baseada numa rede de distribuição portuguesa.

2. CONJUNTOS IMPRECISOS - CONCEITOS BÁSICOS

Um conjunto impreciso normalizado \tilde{A} (1) é caracterizado por uma função de pertença $\mu_{\tilde{A}} \rightarrow [0,1]$ associando a cada elemento x_1 o seu grau de compatibilidade com a definição do conjunto [3, 4]. Em algumas circunstâncias, a função de pertença $\mu_{\tilde{A}}$ de um conjunto impreciso \tilde{A} pode ser interpretada como sendo uma distribuição de possibilidade.

$$\tilde{A} = \{ (x_1, \mu_{\tilde{A}}(x_1)), x_1 \in X_1 \} \quad (1)$$

Um corte de nível α de um conjunto impreciso \tilde{A} definido em X_1 é o conjunto clássico A_α obtido a partir de \tilde{A} para cada $\alpha \in [0,1]$ de acordo com a expressão (2).

$$A_\alpha = \{ x_1 \in X_1 : \mu_{\tilde{A}}(x_1) \geq \alpha \} \quad (2)$$

Um número impreciso é um conjunto impreciso \tilde{A} definido na recta real, convexo, de tal modo que a sua função de pertença é contínua por segmentos. Uma operação aritmética $*$ definida sobre números reais pode ser estendida aos números imprecisos utilizando o Princípio da Extensão. De acordo com este princípio, dados dois números imprecisos \tilde{A} e \tilde{O} , pode obter-se o número impreciso \tilde{Z} correspondente a (3) utilizando (4). Este princípio pode ser utilizado para generalizar para os números imprecisos operações aritméticas como a adição ou o produto. Por outro lado, ao realizar-se a subtração $\tilde{A}-\tilde{O}$ deverá atender-se ao facto de que o resultado será obtido utilizando $\tilde{A}+(-\tilde{O})$

$$\tilde{Z} = \tilde{A} * \tilde{O} \quad (3)$$

$$\mu_{\tilde{A} * \tilde{O}}(z) = \sup \left\{ \min \left(\mu_{\tilde{A}}(a), \mu_{\tilde{O}}(o) \right) \mid \forall a * o = z \right\} \quad (4)$$

De entre os diversos tipos de números imprecisos, os números triangulares e trapezoidais são utilizados com muita frequência. Na figura 1 apresenta-se a função de pertença de um número impreciso trapezoidal que é representado, usualmente, pelos valores extremos dos cortes de nível 0,0 e 1,0 obtendo-se, então, (p_1, p_2, p_3, p_4) . Neste tipo de representação, o resultado da adição e da subtração dos números imprecisos trapezoidais \tilde{A} e \tilde{O} é calculado de forma rápida e eficiente obtendo-se (5) e (6).

$$\tilde{A} + \tilde{O} = (a_1, a_2, a_3, a_4) + (o_1, o_2, o_3, o_4) = (a_1+o_1, a_2+o_2, a_3+o_3, a_4+o_4) \quad (5)$$

$$\tilde{A} - \tilde{O} = (a_1, a_2, a_3, a_4) - (o_1, o_2, o_3, o_4) = (a_1-o_1, a_2-o_2, a_3-o_3, a_4-o_4) \quad (6)$$

Um número impreciso como o representado na figura 1 pode ser utilizado para traduzir o conhecimento relativo aos valores possíveis que, por exemplo, uma potência de carga poderá assumir. Este número, em concreto, poderá ser a tradução da proposição seguinte: *a potência de carga poderá ocorrer entre p₁ e p₄, mas a possibilidade de ocorrer entre p₂ e p₃ é mais elevada*. Um número impreciso deste tipo pode ser, também, interpretado como estando associado a um intervalo impreciso ou, se se pretender, a um intervalo cujos limites são afectados por imprecisão.

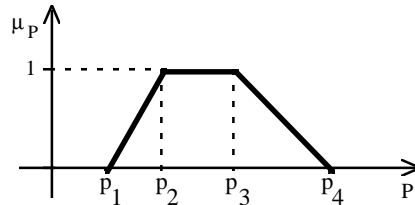


Figura 1 - Número impreciso trapezoidal.

Dado um conjunto de números imprecisos, verifica-se que não é possível associar-lhes uma ordenação estrita. Em diversas aplicações da área de Controlo de Sistemas é corrente a utilização do conceito de Centro de Massa para obter uma relação de ordem parcial. Na aplicação que será descrita nesta comunicação serão utilizados três critérios a invocar por ordem hierárquica [4]: *Removal*, Valor Central e Amplitude. A título de exemplo, o *Removal* do número apresentado na figura 1 é dado por (7). O valor central de um número impreciso é definido como o valor médio do corte de nível 1,0 e a amplitude corresponde à diferença entre os valores extremos do corte de nível 0,0.

$$\text{Re m}(P) = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{2} \quad (7)$$

3. MODELOS CLASSICOS DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

3.1. Aspectos Gerais

Com um processo de estimação de estado pretende-se calcular o valor de um conjunto de variáveis denominadas variáveis de estado que se melhor se adequam a um conjunto de valores medidos tendo em conta um determinado critério. Consideremos, assim, que num problema de estimação de estado se encontram disponíveis *m* medidas e que foram seleccionadas *n* variáveis de estado. Sejam:

- *Z* o vector das medidas (*m* × 1);
- *X* o vector de estado (*n* × 1);
- *h*(.) o vector de funções que relacionam as variáveis de estado com os valores medidos (*m* × 1);
- *ε* é o vector dos erros das medidas (*m* × 1).

De acordo com esta nomenclatura, o modelo geral de estimação de estado é representado por (8). Cada elemento do vector *Z* poderá ser obtido, ou explicado, a partir de uma função *h*(*x*) e de um erro que afectará essas medidas.

$$Z = h (X) + \varepsilon \quad (8)$$

Os elementos do vector das medidas podem ser de diversos tipos:

- medidas de potências injectadas nos barramentos ($S_i = P_i + jQ_i$);
- medidas de trânsitos de potência nos ramos ($S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$);
- medidas do módulo de tensões (V_i);
- medidas do módulo de intensidades de corrente (I_{ij}).

O vector de estado *X* integra, em geral, os módulos e fases das tensões. O vector *ε* inclui informação relativa aos erros das medidas. Estes são considerados como variáveis aleatórias possuindo valor médio nulo e matriz de covariâncias *R*. Estas variáveis aleatórias são consideradas independentes pelo que a matriz *R* é diagonal figurando na sua diagonal principal o valor da variância σ_i^2 do erro de cada medida.

3.2. Algoritmo de Resolução do Problema de Estimação de Estado

Os algoritmos mais usuais associados ao problema de Estimação de Estado pretendem minimizar a soma pesada do quadrado dos erros de acordo com a expressão (9). Os valores de R^{-1} , ou σ_i^{-2} , podem ser utilizados para atribuir pesos diferentes a diversas medidas. Neste âmbito, medidas obtidas a partir de aparelhagem de menor qualidade poderão ser associadas a um maior valor de σ . Pelo contrário, a medidas obtidas a partir de aparelhagem de elevada precisão corresponderão menores valores de σ .

$$\min \epsilon^T R^{-1} \epsilon \quad (9)$$

A equação (9) corresponde a um problema típico de Weighted Least Square - WLS - cuja resolução se encontra bem caracterizada na literatura da especialidade. Substituindo em (9) o valor de ϵ que se obtém de (8) obtém-se (10). A resolução deste problema é obtida formulando um conjunto de equações expressando as condições de estacionaridade da função a otimizar. Este sistema de equações é construído diferenciando (10) em ordem às variáveis de estado X e igualando essas derivadas a zero (11). Nesta expressão H representa o Jacobiano das funções $h(x)$.

$$\min [Z - h(X)]^T R^{-1} [Z - h(X)] \quad (10)$$

$$H(X)^T R^{-1} [Z - h(X)] = 0 \quad (11)$$

Este sistema de equações não lineares pode ser resolvido utilizando o Método de Newton-Raphson. Na iteração $(k+1)$ do algoritmo respectivo os valores actualizados das variáveis de estado são obtidos a partir dos valores disponíveis na iteração k utilizando a expressão (12). Nesta expressão, a matriz G é designada por Matriz de Ganho sendo calculada utilizando a expressão (13). O processo iterativo de cálculo dos valores das variáveis de estado termina quando a diferença entre os valores dessas variáveis nas iterações $k+1$ e k diferirem menos que uma tolerância previamente especificada. Na literatura da especialidade [1] podem encontrar-se diversas versões deste algoritmo sendo as de utilização mais corrente as correspondentes a formulações acopladas e desacopladas.

$$X^{k+1} = X^k + (G^k)^{-1} (H^k)^T R^{-1} [Z - h(X^k)] \quad (12)$$

$$G^k = (H^k)^T R^{-1} (H^k) \quad (13)$$

3.3. Tratamento de Medidas do Módulo de Intensidade de Corrente

O algoritmo apresentado em [2] converte todas as medidas disponíveis em medidas de intensidade de corrente e considera também o vector de estado representado em coordenadas rectangulares. Desta forma, a matriz G é constante para uma determinada rede e para um conjunto de grandezas medidas, sendo por isso invertida apenas uma vez no início do processo. Com um procedimento deste género diminui-se significativamente o tempo de resolução do problema de estimação de estado que é, tradicionalmente, muito influenciado pela operação de inversão da matriz G .

Utilizando um algoritmo deste género ultrapassa-se também problemas de convergência que podem ocorrer quando se consideram, em simultâneo, medidas de intensidades de corrente nos ramos e medidas de potências e tensões. Por outro lado, com este algoritmo o número de iterações a realizar para atingir a convergência do processo iterativo é menor. Como alguma informação existente em redes de distribuição é baseada em medidas de intensidades de corrente, este algoritmo revela-se mais adequado para solucionar o problema de estimação de estado neste tipo de sistemas.

A conversão das medidas existentes para medidas de intensidades de corrente é realizada considerando os valores iniciais das medidas e em cada iteração o valor actual do vector de estado, que integra os valores das partes real e imaginária das tensões nos barramentos. As expressões a utilizar nesta transformação e outros detalhes do algoritmo podem ser fornecidos pelos autores ou obtidos na referência [2].

4. ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO INTEGRANDO DADOS IMPRECISOS

4.1. Aspectos Gerais

Analisemos, agora, como se poderá calcular o vector de estado considerando que pelo menos o valor de uma medida é representada por um número impreciso. Um problema deste género pode ser resolvido de forma eficiente linearizando as funções $h(X)$ dependendo, como se compreende, a qualidade dos resultados obtidos do ponto seleccionado para realizar esta linearização. O algoritmo que apresentaremos em seguida inclui, assim, duas fases. Na primeira é resolvido um problema de estimação de estado clássico integrando, portanto, apenas valores determinísticos para as

medidas. O ponto de funcionamento do sistema assim obtido será utilizado para linearizar as funções $h(X)$ e reflectir nos resultados do problema as imprecisões presentes nos dados.

Consideremos que é conhecido o vector de medidas \tilde{Z} que integra, pelo menos, uma medida representada por um número impreciso. Se as medidas imprecisas forem substituídas pelo respectivo valor central é possível obter um vector Z_1 integrando apenas valores determinísticos. Este vector Z_1 será utilizado para realizar um exercício de estimação de estado clássico que permite obter o vector de estado X_1 de acordo com o algoritmo apresentado no ponto 3.2. Este ponto de funcionamento do sistema será para realizar a linearização referida.

4.2. Integração de Imprecisão nas Medidas

Consideremos, agora, que o valor de, pelo menos, uma medida é representado por um número impreciso. As variações imprecisas no vector das medidas $\Delta\tilde{Z}$ (14) podem ser reflectidas nos resultados do processo de estimação de estado utilizando a matriz de ganho G dada por (13) e construída na última iteração do problema clássico de estimação de estado referido em 4.1. Assim, a expressão (15) poderá ser utilizada para obter as variações imprecisas correspondentes nas variáveis de estado sendo os seus valores imprecisos dados por (16). Deve notar-se que em (14), (15) e (16) os vectores $\Delta\tilde{Z}$, $\Delta\tilde{X}$ e \tilde{X} integram números imprecisos, pelo menos, numa das suas posições. Assim estas expressões integram operações realizadas de acordo com a aritmética dos números imprecisos.

$$\Delta\tilde{Z} = \tilde{Z} - Z_1 \quad (14)$$

$$\Delta\tilde{X} = (G^{-1}H^T R^{-1})\Delta\tilde{Z} \quad (15)$$

$$\tilde{X} = X_1 + \Delta\tilde{X} \quad (16)$$

4.3. Cálculo das Funções de Pertença de Trânsitos de Potência e de Intensidades de Corrente

Analisemos, agora, como é possível construir as funções de pertença de outras variáveis presentes nas redes eléctricas tais como trânsitos de potência e intensidades de corrente. A construção das funções de pertença destas grandezas não deverá ser realizado directamente utilizando as descrições imprecisas das variáveis de estado calculadas com o algoritmo anterior. Na verdade, as operações aritméticas envolvidas originariam resultados afectados por erros elevados. Estas funções de pertença podem ser obtidas directamente a partir do vector de medidas impreciso. Para este efeito, consideremos uma função genérica F_{ij} representando o trânsito de potência activa ou reactiva ou a intensidade de corrente num ramo da rede. Esta função pode ser linearizada considerando os primeiros termos do seu desenvolvimento em série de Taylor em torno do ponto X_1 (17). Nesta expressão, V_i , V_j , θ_i e θ_j representam os módulos e fases das tensões nos barramentos extremos do ramo em análise. As derivadas de P_{ij} , Q_{ij} e I_{ij} em ordem a V_i , V_j , θ_i e θ_j podem ser organizadas de forma matricial na matriz $J_{FL}(X)$ (18). Sendo $\Delta\tilde{FL}$ o vector dos desvios imprecisos das variáveis de estado (18), podemos reescrever as equações (17) de acordo com (19).

$$\Delta\tilde{F}_{ij} \equiv \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial \theta_i} \right|_{X_1} \Delta\tilde{\theta}_i + \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial \theta_j} \right|_{X_1} \Delta\tilde{\theta}_j + \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial V_i} \right|_{X_1} \Delta\tilde{V}_i + \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial V_j} \right|_{X_1} \Delta\tilde{V}_j \quad (17)$$

$$J_{FL}(X) = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_k} \right|_X & \left. \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_k} \right|_X \\ \left. \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_k} \right|_X & \left. \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_k} \right|_X \\ \left. \frac{\partial I_{ij}}{\partial \theta_k} \right|_X & \left. \frac{\partial I_{ij}}{\partial V_k} \right|_X \end{bmatrix} \quad \Delta\tilde{FL} = \begin{bmatrix} \Delta\tilde{P}_{ij} \\ \Delta\tilde{Q}_{ij} \\ \Delta\tilde{I}_{ij} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\Delta\tilde{FL} = J_{FL}(X_1) \Delta\tilde{X} \quad (19)$$

O vector $\Delta\tilde{FL}$ pode ainda ser calculado em função dos desvios do vector das medidas (20) substituindo (13) em (19). Esta expressão pode ser utilizada para calcular os desvios imprecisos de P_{ij} , Q_{ij} e I_{ij} directamente a partir do vector dos desvios das medidas. A função de pertença \tilde{FL} destas grandezas será finalmente dado por (21) em que $FL(X_1)$ representa o valor determinístico dos trânsitos de potência activa ou reactiva ou das intensidades de corrente associados ao vector de estado X_1 .

$$\Delta\tilde{FL} = (J_{FL}(X_1)(G^{-1}H^T R^{-1}))\Delta\tilde{Z} \quad (20)$$

$$\tilde{FL} = FL(X_1) + \Delta\tilde{FL} \quad (21)$$

Por vezes e de forma análoga ao descrito em [7], a construção das funções de pertença do módulo das intensidades de corrente pode ser afectada por erros devidos ao processo de linearização. Esta situação é mais frequente quando os valores das intensidades de corrente são pequenos originando, devido aos erros referidos, graus de pertença não nulos associados a valores negativos. Esta situação é impossível do ponto de vista físico pelo que, nestes casos, as funções de pertença devem ser sujeitas a um processo correctivo, que se encontra descrito de forma detalhada em [5].

5. INTEGRAÇÃO DE MEDIDAS IMPRECISAS DE INTENSIDADE DE CORRENTE

Como foi referido em 1., em redes de distribuição é usual dispor-se de medidas de intensidades de corrente nos ramos pelo se considerou conveniente adaptar o algoritmo apresentado de modo a considerar este tipo de medidas. Esta adaptação utiliza a metodologia de cálculo apresentada em [2] que converte todas as medidas para medidas de intensidade de corrente.

As equações (15) e (16) são alteradas de modo que o vector de estado seja representado em coordenadas rectangulares e que as medidas disponíveis sejam todas medidas de intensidade de corrente ou convertidas para medidas deste tipo. Utilizando a aritmética dos números imprecisos, a equação (14) deverá ser também alterada de modo a que sejam convertidas as medidas das grandezas disponíveis em medidas de intensidade de corrente. Este processo deverá permitir converter as potências injectadas em intensidade de corrente injectada, por um lado, e os trânsitos de potência e módulos da intensidade da corrente em intensidades de corrente (parte real e imaginária), por outro.

As equações (20) e (21) que permitem calcular os trânsitos de potências e as intensidades de correntes também podem ser utilizadas desde que o vector $\Delta \tilde{Z}$ seja definido após a conversão operada anteriormente, e que os elementos da matriz $J_{FL}(X)$ sejam derivadas das intensidades de correntes em ordem às tensões representadas em coordenadas rectangulares.

O vector de estado impreciso disponibilizado no final deste algoritmo encontra-se em coordenadas rectangulares. Para calcular os módulos das tensões nos barramentos pode-se utilizar a aritmética dos números imprecisos procedendo de forma análoga ao caso determinístico. No caso de se pretender calcular os ângulos das tensões nos barramentos poderá utilizar-se, também, a aritmética dos números imprecisos para calcular o quociente entre uma parte imaginária e a parte real respectiva. Em seguida, deverá utilizar-se o Princípio da Extensão referido na secção 2. para estender a função arco-tangente ao domínio dos conjuntos imprecisos.

6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Os conceitos e algoritmos descritos foram utilizados para avaliar o comportamento da rede de distribuição a 15 kV representada na Figura 2. Esta rede integra 28 barramentos, 27 linhas, duas subestações (nós 1 e 28) e dois barramentos de geração. Ao nó 24 encontra-se ligado uma central mini-hídrica e ao 8 um parque de geradores eólicos.

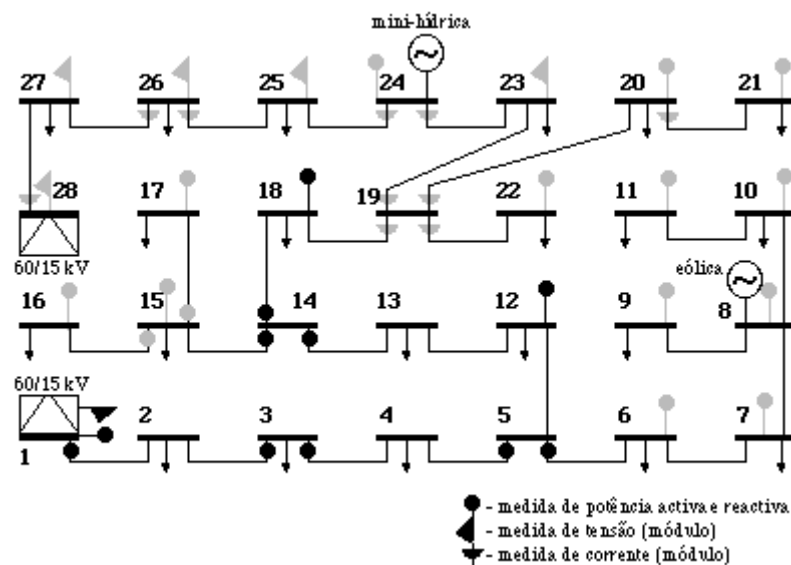


Figura 2 - Esquema simplificado da rede em estudo.

Na Figura 2 encontram-se representados, também, os locais onde se encontram instalados aparelhos de medida (círculos e triângulos escuros). Como os aparelhos instalados são apenas 12, a informação telemetrada revela-se insuficiente. Por esta razão supôs-se que em alguns barramentos ou linhas do sistema existe algum conhecimento sobre as grandezas correspondentes representado por números imprecisos.

6.1. Dados

Os dados da rede utilizados neste exemplo encontram-se nas seguintes tabelas:

- Tabela 1 - localização e valores das medidas nos barramentos. Em relação às medidas de potências activa e reactiva são indicados: o número do barramento, o peso, o valor (em p.u.) e o modificador linguístico que afecta a medida de potência injectada. Em relação às medidas de tensão é indicado para além do número do barramento, o peso, o valor (em p.u.) e o modificador linguístico que afecta a medida do módulo de tensão.

barra	medida	peso	P ou V (pu)	incerteza	peso	Q (pu)	incerteza
1	Potência	2.0	0.2577	Nenhuma	2.0	0.1075	Nenhuma
6	"	1.0	-0.0280	Bastante	1.0	-0.0190	Bastante
7	"	1.0	-0.0138	Bastante	1.0	-0.0067	Bastante
8	"	1.0	0.0300	Muita	1.0	0.0400	Muita
9	"	1.0	-0.0260	Bastante	1.0	-0.0195	Bastante
10	"	1.0	-0.0080	Bastante	1.0	-0.0060	Bastante
11	"	1.0	-0.0120	Bastante	1.0	-0.0070	Bastante
15	"	1.0	-0.0080	Bastante	1.0	-0.0040	Bastante
16	"	1.0	-0.0080	Bastante	1.0	-0.0040	Bastante
17	"	1.0	-0.0120	Bastante	1.0	-0.0090	Bastante
20	"	1.0	-0.0375	Bastante	1.0	-0.0300	Bastante
21	"	1.0	-0.0260	Bastante	1.0	-0.0195	Bastante
22	"	1.0	-0.0500	Bastante	1.0	-0.0310	Bastante
24	"	1.0	0.1000	Bastante	1.0	0.0800	Bastante
12	"	2.0	-0.0307	Nenhuma	2.0	-0.0179	Nenhuma
18	"	2.0	-0.0150	Nenhuma	2.0	-0.0106	Nenhuma
1	Tensão	2.0	1.0000	Nenhuma			
23	"	2.0	0.9895	Pouca			
25	"	2.0	0.9941	Pouca			
26	"	2.0	0.9957	Pouca			
27	"	2.0	0.9967	Pouca			
28	"	2.0	1.0000	Pouca			

Tabela 1 - Medidas nos barramentos.

- Tabela 2 - localização e valores das medidas nas linhas. Em relação às medidas de potências são indicados os barramentos extremos da linha respectiva, o peso, o valor (em p.u.) das potências activa e reactiva e os modificadores linguísticos que afectam estas medidas. Em relação às medidas de intensidade de corrente é indicado, para além dos barramentos extremos da linha respectiva, o peso, o valor (em p.u.) e o modificador linguístico respectivo.

- Tabela 3 - características das linhas da rede. Nesta tabela são indicados para cada linha, os barramentos extremos da linha, a resistência (em p.u.), a reactância (em p.u.) e a semi-admitância (em p.u.).

A incerteza que afecta as medidas foi especificada utilizando os modificadores linguísticos indicados em seguida. A função de pertença de uma grandeza afectada por imprecisão é obtida multiplicando o valor determinístico pelo modificador respectivo. O modificador **Nenhuma** corresponde a um valor determinístico.

- **Nenhuma** - (1.00 ; 1.00 ; 1.00 ; 1.00)
- **Pouca** - (0.95 ; 0.98 ; 1.02 ; 1.05)
- **Muita** - (0.90 ; 0.95 ; 1.05 ; 1.10)
- **Bastante** - (0.80 ; 0.90 ; 1.10 ; 1.20)

Tanto os valores centrais das medidas imprecisas como os valores telemetrados utilizados no exemplo apresentado, foram gerados a partir dos resultados de um estudo de trânsito de potências. Por forma a realizar um estudo de estimação de estado em condições realistas, os valores das grandezas utilizados como medidas e obtidas no final do estudo de trânsito de potências referido foram afectados por erros com carácter aleatório (distribuição uniforme no intervalo [0.9 ; 1.1] vezes o valor da grandeza correspondente). Os resultados apresentados foram obtidos numa

situação em que cerca de 50% das medidas estavam afectadas por erros. Os valores centrais das medidas imprecisas coincidem com os obtidos com o estudo de trânsito de potências referido.

barra	barra	medida	peso	P ou I (pu)	incerteza	peso	Q (pu)	incerteza
1	2	Potência	2.0	0.2534	Nenhuma	2.0	0.1088	Nenhuma
3	2	"	2.0	-0.2085	Nenhuma	2.0	-0.0690	Nenhuma
3	4	"	2.0	0.1721	Nenhuma	2.0	0.0475	Nenhuma
5	4	"	2.0	-0.1622	Nenhuma	2.0	-0.0178	Nenhuma
5	12	"	2.0	0.0922	Nenhuma	2.0	-0.0004	Nenhuma
14	15	"	2.0	0.0280	Nenhuma	2.0	0.0175	Nenhuma
14	13	"	2.0	-0.0358	Nenhuma	2.0	0.0307	Nenhuma
14	18	"	2.0	0.0099	Nenhuma	2.0	-0.0476	Nenhuma
15	16	"	1.0	0.0080	Bastante	1.0	0.0040	Bastante
15	17	"	1.0	0.0120	Bastante	1.0	0.0090	Bastante
19	20	Corrente	1.0	0.0815	Muita			
19	22	"	1.0	0.0596	Muita			
19	23	"	1.0	0.1853	Muita			
19	18	"	1.0	0.0598	Muita			
20	21	"	1.0	0.0329	Muita			
24	23	"	1.0	0.2426	Muita			
24	25	"	1.0	0.1154	Muita			
26	25	"	1.0	0.1229	Muita			
26	27	"	1.0	0.1362	Muita			
28	27	"	1.0	0.1455	Muita			

Tabela 2 - Medidas nas linhas.

nós extremos	r (pu)	x (pu)	ys/2.10 ⁻⁵ (pu)
1 2	.01152	.00776	1.2
2 3	.01047	.00706	1.1
3 4	.00621	.00418	0.7
4 5	.00384	.00259	0.4
5 6	.00914	.00444	0.7
6 7	.01280	.00621	0.9
7 8	.01097	.00533	0.8
8 9	.02560	.00911	1.3
8 10	.01097	.00533	0.8
10 11	.01280	.00456	0.7
5 12	.01920	.01294	2.0
12 13	.03456	.02329	3.5
13 14	.00435	.00293	0.5
14 15	.01463	.00710	1.1
15 16	.00768	.00273	0.4
15 17	.00922	.00328	0.5
14 18	.03226	.02173	3.4
18 19	.00461	.00361	0.5
19 20	.01280	.00621	0.9
20 21	.01280	.00456	0.7
19 22	.01463	.00710	1.1
19 23	.00448	.00302	0.5
23 24	.01151	.00776	1.0
24 25	.00960	.00647	1.0
25 26	.01151	.00776	1.0
26 27	.00640	.00431	0.7
27 28	.01920	.01294	2.1

Tabela 3 - Elementos característicos das linhas da rede.

6.2. Algoritmo para Avaliar a Qualidade dos Resultados

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelo método apresentado neste artigo, foi implementado um método alternativo baseado na realização de múltiplos sorteios. Este processo alternativo consiste em discretizar as funções de pertença especificadas num conjunto de cortes de nível α (níveis 1.00, 0.75, 0.50, 0.25 e 0.00, por exemplo). Para cada corte de nível α e para cada medida imprecisa é sorteado um valor no intervalo correspondente a esse corte.

Após repetir este processo para todas as medidas imprecisas é realizado um estudo de estimação de estado clássico em que as medidas imprecisas são substituídas pelos valores sorteados. No final de cada estudo são guardados os valores mínimos e os máximos assumidos por cada elemento do vector de estado e por cada elemento do vector de fluxos. Repetindo esta sequência um elevado número de vezes (no exemplo apresentado foram executados 5000 sorteios para cada corte de nível α) é possível avaliar o corte de nível α de cada elemento do vector de estado e do vector dos fluxos.

Repetindo este processo para todos os cortes de nível α considerados é possível reconstruir as funções de pertinência das grandezas do vector de estado e do vector de fluxos. Convém salientar que o tempo associado a esta simulação é muito elevado. Com os resultados obtidos por este processo e os resultados obtidos pelo método directo é possível realizar algumas comparações de modo a verificar a qualidade dos resultados obtidos pelo método directo.

6.3. Alguns Resultados e Comentários

Nas figuras 3, 4 e 5 são apresentadas as funções de pertinência de diversas grandezas. Nestas figuras, a traço cinzento é apresentada a função de pertinência especificada, a traço preto é apresentada a função de pertinência obtida no final do processo de estimação de estado utilizando o algoritmo apresentado nos pontos 3, 4 e 5. Os círculos pretos correspondem aos valores extremos dos cortes de nível 1.00, 0.75, 0.50, 0.25 e 0.00 obtidos utilizando o algoritmo apresentado no ponto 6.2.

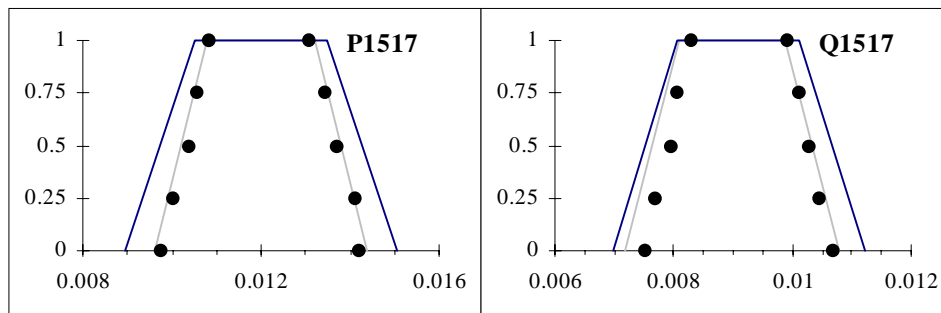


Figura 3 - Funções de pertinência dos trânsitos de potências activa e reactiva na linha 15 - 17.

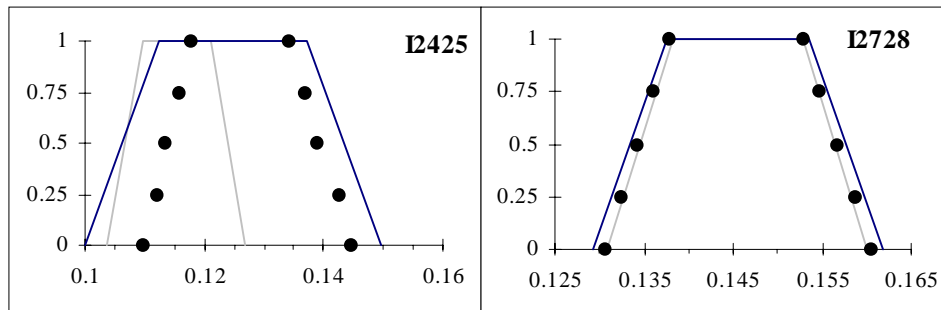


Figura 4 - Funções de pertinência da intensidade de corrente nas linhas 24 - 25 e 27 - 28.

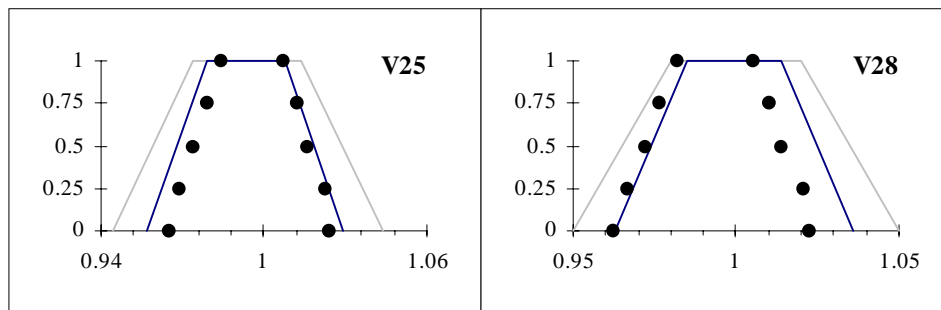


Figura 5 - Funções de pertinência do módulo da tensão nos barramentos 25 e 28.

Na tabela 4 são apresentados os erros relativos médios e máximos do *Removal*, valor central e amplitude associados a diversas grandezas. Estes erros foram obtidos por comparação das funções de pertinência construídas com o algoritmo de

estimação de estado apresentado nas secções 3, 4 e 5 com as obtidas utilizando o método alternativo apresentado em 6.2.

	valor central		amplitude		remoção	
	média	máximo	média	máximo	média	máximo
Vreal	0.13%	0.57%	23.52%	25.88%	0.05%	0.31%
Vimag	0.02%	0.27%	0.04%	0.15%	0.02%	0.27%
Pij	2.44%	15.54%	16.32%	140.78%	1.80%	15.60%
Qij	21.18%	155.53%	18.29%	83.99%	2.99%	34.98%
Iij	0.19%	1.58%	18.40%	96.99%	0.01%	0.16%
global	4.76%	155.53%	15.38%	140.78%	0.97%	34.98%

Tabela 4 - Erros relativos dos resultados obtidos com método proposto.

Em relação a este conjunto de resultados é possível verificar:

i) o algoritmo de estimação de estado descrito nas secções 3, 4 e 5 permite obter, em geral, resultados de boa qualidade. A este respeito pode notar-se que, em geral, as funções de pertença disponibilizadas por esse algoritmo incluem as funções de pertença obtidas utilizando o algoritmo alternativo referido em 6.2. De entre as funções de pertença esquematizadas nas figuras 3, 4 e 5 esta situação não é válida, apenas, para o módulo da tensão no barramento 28;

ii) a comparação sistemática das grandezas estimadas calculadas pelos dois algoritmos referidos fornece resultados bastante satisfatórios no que se refere ao *Removal* - erro médio relativo global de 0.97%. Em relação aos resultados obtidos para o valor central pode notar-se a existência de erros relativos médios elevados para alguns trânsitos de potência activa e reactiva. Esta situação deverá ser interpretada com cuidado dado que o método alternativo descrito em 6.2 se baseia num processo de sorteios aleatórios pelo que poderá não permitir identificar os valores extremos do corte de nível α de algumas grandezas. Desta forma, o algoritmo alternativo referido poderá ter avaliado o valor mínimo de um dado corte de uma dada variável por excesso ou o valor máximo por defeito. Este facto poderá, só por si, originar erros significativos do valor central que não são devidos, afinal, ao método proposto;

iii) algo de semelhante - avaliação pelo método alternativo do valor mínimo do corte de nível 0.0 por excesso e do valor máximo respectivo por defeito - poderá explicar os elevados erros relativos que, exceptuando os associados às funções de pertença da parte imaginária da tensão, podem ser encontrados na tabela 4 para a amplitude;

iv) comparando as funções de pertença especificadas - dados do processo de estimação de estado - e estimadas - resultados do processo referido - representadas nas figuras 3 a 5 pode verificar-se que em alguns casos as primeiras contêm as segundas (casos do módulo da tensão nos nós 25 e 28) e noutros as segundas contêm as primeiras (casos dos trânsitos de potência no ramo 15-17 e do módulo da intensidade de corrente no ramo 27-28). As funções de pertença especificada do módulo da intensidade de corrente no ramo 24-25 não contêm a estimada e vice-versa. Este comportamento deve-se ao facto de as medidas telemetradas especificadas terem sido afectadas por um erro variando entre -10% e +10% para efeito da realização do estudo de estimação de estado e de os valores afectados por imprecisão variarem, no seu corte de nível 0.0 e para o modificador “bastante”, de -20% a +20% do valor resultante do estudo de fluxo de potências. Este conjunto de valores especificados revelou-se incoerente no sentido em que não são verificadas as leis dos circuitos eléctricos. O processo de estimação de estado ajusta os valores dessas grandezas de acordo com o critério referido em 3. O carácter radial da rede em análise não permite obter qualquer tipo de compensações que podem ser obtidas em redes emalhadas. Nestas, a existência de erros elevados afectando algumas grandezas pode ser compensado pelo conhecimento mais preciso doutras grandezas;

v) não pode deixar de se assinalar que os tempos de execução computacional dos dois algoritmos descritos são radicalmente diferentes. O algoritmo descrito nas secções 3 a 5 exige, apenas, a execução de um estudo clássico de estimação de estado. Todos os cálculos subsequentes permitindo a integração de informação representada por números imprecisos são executados de forma rápida não existindo nenhum processo iterativo envolvido. O algoritmo descrito em 6.2 baseia-se na realização de um conjunto de sorteios. No exemplo apresentado, as funções de pertença dos dados foram discretizadas em cinco cortes de nível α e, para cada um deles, foram sorteados 5000 conjuntos de medidas perfazendo, no total, 25 000 estudos clássicos de estimação de estado. Verifica-se, assim, que neste caso o método proposto é, aproximadamente, 25 000 vezes mais rápido que o algoritmo baseado nos sorteios. De alguma forma, os erros inerentes ao método proposto podem ser considerados como o preço a pagar por este aumento de eficiência computacional.

7. CONCLUSÕES

Nesta comunicação foi caracterizado o problema de estimação de estado particularmente no que se refere às redes de distribuição de energia. Este problema assume hoje uma actualidade crescente em face da migração do conceito de EMS para as redes de distribuição dando origem aos DMS que, necessariamente, deverão incluir uma metodologia de estimação de estado. O algoritmo apresentado nesta comunicação permite responder a dois desafios colocados pelas redes de distribuição: por um lado a necessidade de integração de medidas de intensidade de corrente, e por outro, a existência, em geral, de poucas medidas telemetradas. Neste âmbito, o algoritmo permite integrar informação representada por conjuntos imprecisos disponibilizada por peritos ou obtida a partir de algoritmos de classificação de cargas. A integração dos diversos sistemas de tratamento de informação existentes nas empresas de electricidade permitirá obter informação adicional a partir dos registos de facturação e, assim, obter um conhecimento mais aprofundado e completo do estado do sistema.

A conversão de toda a informação disponível (medidas telemetradas e informação sob a forma de números imprecisos) em medidas de intensidade de corrente permite responder de forma eficiente ao outro desafio identificado. O algoritmo desenvolvido permite obter descrições imprecisas que caracterizam o comportamento possível das grandezas do vector de estado e de trânsitos de potência e intensidades de corrente, reflectindo de forma eficiente a imprecisão presente nos dados. Importante salientar que este processo se revela muitíssimo eficiente do ponto de vista de tempo de cálculo se for comparado com o tempo associado ao algoritmo baseado na realização de sorteios também descrito nesta comunicação.

O desenvolvimento tecnológico, a crescente automatização e a disponibilização de novas aplicações computacionais, de que a aplicação apresentada é um exemplo, permitirão melhorar finalmente a segurança de exploração das redes de energia eléctrica e disponibilizar um serviço de qualidade acrescida.

REFERÊNCIAS

- [1] M.B. Do Coutto Filho, A.M. Leite da Silva, e D.M. Falcao, "Bibliography on power system state estimation (1968-1989)", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No.3, Aug. 1990.
- [2] C.N. Lu, J.H. Teng, e W.-H.E. Liu, "Distribution System State Estimation", Proceedings of IEEE/PES 1994 Winter Meeting, New York, 1994.
- [3] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and Control, pp. 338 - 353, August 1965.
- [4] A. Kaufmann, e M.M. Gupta, Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science, North Holland ed., 1988.
- [5] V. Miranda, J. Pereira, e J.T. Saraiva, "Experiences in State Estimation Models for Distribution Systems Including Fuzzy Systems", Proceedings of Stocholm Power Tech, Stocholm, Sweden, June 1995.
- [6] J. Pereira, "Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Energia com Medidas Imprecisas", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Fevereiro 1995.
- [7] V. Miranda, M. Matos, e J.T. Saraiva, "Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation", 10th PSCC, Graz, August 1990; Proceedings of the 10th PSCC, Butterworths, London.
- [8] J.T. Saraiva, V. Miranda, e L.M.V.G. Pinto, "Impact on Some Planning Decisions From a Fuzzy Modeling of Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, no.2, May 1994; também Proceedings of 18th PICA Conference, Scottsdale, Phoenix, Arizona, May 1993.
- [9] J.T. Saraiva, V. Miranda, e M.A. Matos, "Generation and Load Uncertainties Incorporated in Load Flow Studies", Proceedings of MELECON 91, Ljubljana, 1991.
- [10] J.T. Saraiva, V. Miranda, e L.M.V.G. Pinto, "Generation Transmission Power System Reliability Evaluation by Monte Carlo Simulation Assuming a Fuzzy Load Description", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 11, no.2, May 1996.

Agradecimento - O trabalho descrito nesta comunicação foi parcialmente financiado pelo contrato PRAXIS 43/94.