

UM MODELO AVANÇADO PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO INCLUINDO CONCEITOS DA TEORIA DOS FUZZY SETS E INFORMAÇÃO RELATIVA A APARELHAGEM DE CORTE

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

João Tomé Saraiva
e.mail: jpts@lorde.inescn.pt
Fac. Engenharia U. Porto - DEEC
Fax: +351.2.2084172

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

Resumo

Nesta comunicação é apresentado um algoritmo para resolução do problema de estimação de estado concebido, em especial, para utilização em DMS - "Distribution Management Systems". Na comunicação evidenciam-se as principais dificuldades da resolução deste problema para redes de distribuição, propondo-se uma metodologia em que se consideram dados de natureza qualitativa representados por números imprecisos em conjugação com a informação, em geral escassa, disponível a partir de aparelhos de medida. Outro tipo de informação que é considerada está associada ao estado da aparelhagem de corte, sendo possível incluir variáveis de estado associadas ao estado desses equipamentos. A finalizar apresenta-se um exemplo utilizando uma rede típica de distribuição.

Palavras chave: Estimação de Estado, Redes de Distribuição, Imprecisão, Aparelhagem de corte.

1. Introdução

No passado as empresas do sector eléctrico canalizaram uma parte muito substancial dos seus recursos financeiros para realizar investimentos nos subsistemas de produção e transmissão de energia. Esta estratégia era justificada pelo aumento constante e em percentagem elevada das potências de carga a alimentar e pela necessidade de dispor de sistemas produtores e de transmissão robustos no sentido em que a necessidade de proceder ao deslastre de carga deveria ser mínima, mesmo que ocorressem saídas de serviço. Entretanto, o enquadramento macro-económico e legal que determina, pelo menos parcialmente, a actuação das empresas do sector eléctrico alterou-se de forma substancial.

Em primeiro lugar, os anos caracterizados por um elevado e contínuo crescimento da energia eléctrica consumida deram lugar a um período de estagnação e, em muitos países, de diminuição do consumo de energia eléctrica. Esta situação integra-se na crise energética mais geral e nos problemas de crescimento económico que muitos países industrializados têm enfrentado. Por esta razão, muitos países adoptaram políticas de melhoria da eficiência energética e mesmo de substituição da utilização da energia eléctrica por outras formas de energia. Ao longo deste período cresceu também a convicção de que a energia eléctrica é um bem de que, apesar de tudo, as sociedades dependem fortemente pelo que os consumidores esperam poder dispor de um serviço caracterizado por uma elevada continuidade e qualidade.

Ao longo dos últimos anos o enquadramento legal do sector eléctrico alterou-se de forma, por vezes, drástica. Em muitos casos, o processo iniciou-se com alterações legais destinadas a liberalizar a propriedade de centros produtores de energia eléctrica. Por exemplo, em Portugal o Decreto-Lei 189/88 de 27 de Maio incentivou a instalação de unidades de cogeração industrial e centrais mini-hídricas que, em muitas situações, se interligaram a redes de distribuição. Nos EUA após a publicação, em 1989, do

“EPA - Electricity Policy Act” - verificou-se que a potência instalada não pertencente a empresas tradicionais - “NUG - Non Utility Generation” - passou de 16% em 1985 para 64% em 1992. Apesar de tudo, durante a década de 80 o sector eléctrico manteve-se relativamente imune ao movimento de reestruturação e desregulamentação que contagiou outros sectores de actividade. Na década de 90, no entanto, este movimento chegou ao sector eléctrico da generalidade dos países europeus e do continente americano justificando a necessidade de monitorizar de forma mais completa a operação desses sistemas.

Todos estes factores concorreram para que as empresas do sector eléctrico deixassem de ser encaradas como entidades que dispunham de potência instalada e para as quais a eficiência e racionalidade económicas e o mercado não eram importantes para passarem a ser consideradas entidades que actuam num ambiente fortemente competitivo no qual a qualidade de serviço se revela crucial.

A necessidade de continuar a melhorar a qualidade de serviço, a existência de centros produtores ligados às redes de distribuição, o ambiente competitivo, e a existência de disponibilidades financeiras fizeram com que passassem a ser dirigidos elevados investimentos para as redes de distribuição, e nomeadamente para a sua automatização e para o desenvolvimento de sistemas de gestão da sua operação. Estes sistemas começaram por se desenvolver nas redes de transmissão - “EMS - Energy Management Systems” - tendo este conceito, devidamente adaptado, começado a migrar mais tarde para as redes de distribuição - “DMS - Distributions Management Systems”. Por esta razão, e dadas as características particulares das redes de distribuição de energia, deverão ser desenvolvidas novas metodologias mais adaptadas a estes sistemas.

Nesta comunicação apresenta-se um modelo de estimação de estado a utilizar em redes de distribuição de energia que integra três aspectos essenciais: integração de medidas telemetradas existentes na base de dados do SCADA, integração de informação qualitativa modelizada por conceitos da Teoria dos “Fuzzy Sets”, e inclusão de variáveis de topologia que permitem simular o desconhecimento em relação ao estado de aparelhagem de corte. A finalizar apresentam-se resultados utilizando uma rede distribuição realista que ilustram a utilização deste modelo e o interesse da sua aplicação.

2. Estimação de Estado em Redes de Distribuição

Até há pouco, a necessidade de um algoritmo de Estimação de Estado [1, 2] aplicável a redes de distribuição não era completamente adquirido. Mas o incremento dos processos de automatização das redes e, principalmente, a expansão, muitas vezes explosiva, de produção dispersa ligada directamente a redes até 30 kV, tornou imperiosa essa necessidade. Os sistemas de distribuição deixaram de ser passivos, passando a apresentar algumas das características comuns nos sistemas de produção-transporte sem, no entanto, perderem as características que tornam a sua modelização matemática complexa.

As redes de distribuição são, em primeiro lugar, redes de grande dimensão a que se encontram directamente ligados consumidores e uma variedade de centros produtores em geral não controlados por um despacho central. Em segundo, trata-se de redes que são usualmente exploradas de forma radial se bem que, em geral, a possibilidade de reconfiguração seja elevada. Acresce que a topologia em operação é alterada com alguma frequência, ao contrário do que ocorre nas redes de transmissão em que a estrutura em exploração se encontra, em geral, estabilizada. Por último, nas redes de distribuição existem poucas medidas telemetradas pelo que a realização de estudos de estimação de estado utilizando os modelos tradicionais se encontra comprometida. Neste sentido em [3, 4] foi apresentado um novo modelo de estimação de estado a utilizar em particular em redes de distribuição. Este modelo permite integrar, não apenas, medidas telemetradas disponíveis nos SCADA mas, também, representações imprecisas das potências de carga nos nós construídas com base no conhecimento de padrões típicos de consumo e utilizando conceitos da Teoria dos “Fuzzy Sets” [5, 6]. Desta forma, é possível obter uma imagem do estado de uma rede de distribuição em que se reflectem nos resultados a imprecisão presente nos dados garantindo-se, por outro lado, a coerência entre dados e valores estimados. A Teoria dos “Fuzzy Sets” tem sido aplicada com sucesso à modelização de diversos problemas relacionados com a exploração e o planeamento de sistemas eléctricos como se pode verificar, por exemplo, nas referências [7, 8, 9 e 10].

Outro ponto que se revela crucial abordar em redes de distribuição refere-se à alteração da sua configuração. Estas alterações são muito frequentes, podendo acontecer que a informação disponível relativa ao estado de alguns aparelhos de corte seja incorrecta, ou inexistente. Esta situação corresponde, na prática, ao desconhecimento da estrutura da rede que, em dado momento, está a ser explorada. Para

ultrapassar esta dificuldade apresenta-se nesta comunicação um modelo de estimação de estado que integra variáveis binárias correspondente ao estado da aparelhagem de manobra. Como resultado deste processo, obtêm-se os valores das variáveis de estado do problema afectadas, algumas delas por incerteza, e o estado dos aparelhos de corte que, em conjunto, melhor explicam os dados disponíveis.

Acresce, a finalizar, que nas redes de distribuição as medidas disponíveis se referem, em geral, a intensidades de corrente (nomeadamente nas saídas de subestações), contrariamente ao que ocorre nos sistemas de produção-transporte. Por esta razão, também aqui se exige alguma adaptação dos algoritmos existentes por forma a integrar este tipo de medidas.

3. Modelo de Estimação de Estado

3.1. Modelo Tradicional Integrando Variáveis de Topologia

A estimação de estado apresenta como principal objectivo o cálculo do valor de um conjunto de variáveis - variáveis de estado - que melhor se ajustam a um conjunto de medidas de acordo com determinado critério. Se considerarmos que existem m medidas disponíveis e n variáveis cujo valor se pretende estimar, é possível definir os vectores seguintes:

- Z - vector das medidas, com m elementos;
- X - **vector de estado**, com n elementos;
- $h(.)$ - vector de funções que relacionam as medidas (m funções) com as variáveis de estado;
- ε - **vector dos erros das medidas** (m resíduos).

O modelo geral de estimação de estado é dado por:

$$Z = h(X) + \varepsilon \quad (1)$$

O vector Z pode integrar medidas de potências injectadas, trânsitos de potência e correntes em ramos, módulos de tensões e informação relativa ao estado de aparelhagem de corte. Tradicionalmente, os elementos do vector de estado - **variáveis de estado** - são os módulos e as fases das tensões nos barramentos. No algoritmo a apresentar o vector de estado integra, também, variáveis representativas do estado de aparelhagem de corte existente na rede. Nesta primeira abordagem a este problema, a formulação permite considerar variáveis D_{ij} que representam o conhecimento existente sobre o facto de o ramo entre os nós i e j se encontrar, ou não, em serviço. Com uma formulação deste tipo é possível identificar as linhas que se encontram efectivamente em serviço, ou seja, obtém-se a configuração da rede que melhor se adapta às medidas e outra informação existente. A principal dificuldade que surge com a introdução destas variáveis resulta do seu carácter binário, isto é, só podem assumir os valores zero e um que correspondem, respectivamente, ao estado aberto e fechado. A introdução de variáveis deste tipo em diversos problemas, por exemplo em problema de optimização, aumenta a sua complexidade e, com frequência, compromete de forma irremediável a sua resolução em tempo útil.

A integração das variáveis de topologia no vector de estado apresenta, ainda, outras consequências no vector $h()$ que, como se referiu anteriormente, relaciona os valores medidos com as variáveis de estado. Com efeito, as funções que integram o vector $h()$ relativas a medidas de trânsitos de potência activa e reactiva em ramos do sistema e a potências injectadas deverão integrar, agora, variáveis de topologia D_{ij} representativas do facto de um ramo entre os nós i e j se encontrar, ou não, em serviço. As expressões (2) a (5) reflectem precisamente esta situação para as grandezas referidas.

$$P_{ij}^{med} = \left[-G_{ij} V_i^2 + V_i V_j \left[G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \right] \right] D_{ij} \quad (2)$$

$$Q_{ij}^{med} = \left[\left(B_{ij} - \frac{Y_{sij}}{2} \right) V_i^2 + V_i V_j \left[G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \right] \right] D_{ij} \quad (3)$$

$$P_i^{med} = \sum_j \left[-G_{ij} V_i^2 + V_i V_j \left[G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \right] \right] D_{ij} \quad (4)$$

$$Q_i^{med} = \sum_j \left[\left(B_{ij} - \frac{Y_{sij}}{2} \right) V_i^2 + V_i V_j \left[G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \right] \right] D_{ij} \quad (5)$$

Nestas expressões:

- P_{ij}^{med} e Q_{ij}^{med} representam os elementos do vector das medidas referentes ao trânsito de potência activa e reactiva, respectivamente, no ramo $i j$;
- P_i^{med} e Q_i^{med} representam os elementos do vector das medidas referentes à potência activa e reactiva, respectivamente, injectada no barramento i ;
- D_{ij} representa o elemento do vector de estado referente ao estado do ramo ij ;
- V_i e V_j representam os elementos do vector de estado referentes ao módulo da tensão nos barramentos i e j ;
- θ_i e θ_j representam os elementos do vector de estado referentes à fase da tensão nos barramentos i e j ;
- G_{ij} e B_{ij} são a parte real e imaginária do elemento $i j$ da matriz das admitâncias;
- y_{sij} representa a admitância shunt do ramo ij .

3.2. Tratamento das variáveis de topologia

Como foi referido, a introdução de variáveis binárias introduz uma complexidade acrescida em problemas de optimização dado o carácter descontínuo que lhes está associado. Diversos modelos têm deparado com este problema existindo algoritmos que substituem estas variáveis por variáveis contínuas limitadas ao intervalo $[0, 1]$ realizando-se, no final, um arredondamento para o valor extremo mais próximo. Esta abordagem é, como se compreende, incorrecta mas as alternativas correspondentes a metodologias de tipo “Branch and Bound” assumem, em geral, um peso computacional incontrolável.

Uma forma possível de ultrapassar o carácter descontínuo deste tipo de variáveis impondo, todavia, que os valores admissíveis são 0 e 1 consiste em restringir estas variáveis por equações do tipo (6). Esta equação tem como soluções os valores 0 e 1 pelo que a sua integração em problemas de optimização obriga a que, de acordo com o critério adoptado, o valor final destas variáveis seja 0 ou 1.

$$x^2 - x = 0 \quad (6)$$

O conhecimento relativo ao estado de um ramo do sistema foi, nesta abordagem, modelizado considerando duas situações possíveis. Na primeira, existe informação na base de dados do SCADA relativa ao estado desse ramo. Isto significa que a variável correspondente possui o valor 0 ou 1. Admite-se, no entanto, que esse valor pode estar errado devido, por exemplo, à ocorrência de problemas no sistema de transmissão de informação. Neste caso, a função a incluir no vector $h()$ é dada por (7).

Na segunda situação, pode não existir qualquer informação na base de dados do SCADA relativa ao estado desse ramo. Nesta situação, a função a incluir no vector $h()$ é dada por (8)

$$D_{ij}^{med} = D_{ij}^2 + \epsilon_k \quad (7)$$

$$0 = D_{ij} - D_{ij}^2 + \epsilon_k \quad (8)$$

Nestas expressões:

- D_{ij}^{med} representa o elemento do vector das medidas referente ao estado do ramo ij ;
- D_{ij} representa a variável de estado referente ao ramo ij .
- ϵ_k representa o elemento do vector dos erros das medidas associado a estas medidas.

A propósito da expressão (7), convém salientar que quando o erro ϵ_k tende para zero a única solução admissível coincide com o valor já existente para essa variável. Assim, fica reforçada a ideia de que o valor D_{ij} têm de ser 0 ou 1. De forma análoga, quando em (8) o erro ϵ_k tende para 0 os únicos valores que a variável do estado D_{ij} pode valer é 0 ou 1. Dado que o problema de estimação de estado é

tradicionalmente resolvido minimizando o somatório do quadrado dos erros ε_k obriga-se que na solução final, as variáveis D_{ij} assumem os valores pretendidos.

3.3. Algoritmo de Resolução

Os erros que afectam os valores dos aparelhos de medidas são usualmente considerados variáveis aleatórias com distribuição normal possuindo valor médio nulo e matriz de covariância R diagonal. Os elementos da diagonal correspondem à variância das medidas. Os elementos da matriz inversa de R podem ser interpretados como pesos associados às medidas. Neste sentido, medidas em relação às quais se possua uma confiança elevada - obtidas, exemplo, a partir de aparelhos de medida de grande precisão - possuem variância pequena e, portanto, um peso elevado contribuindo, assim, de forma mais nítida para o resultado final do estudo de estimação de estado. Em relação às variáveis D_{ij} o peso que lhes será atribuído deverá ser elevado nos casos em que não se disponha de medidas. Desta forma, contribui-se para que o erro ε_k correspondente seja pequeno.

O problema da estimação de estado em sistemas eléctricos de energia pode ser resolvido por duas abordagens que se descrevem, de forma sucinta, em seguida. A primeira destas metodologias é baseada na minimização da soma dos valores absolutos dos erros sendo, por isso, adoptadas técnicas de programação linear para a sua resolução. A segunda baseia-se na minimização da soma pesada dos quadrados dos erros, de acordo com a expressão (9).

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

A formulação (9) traduz a abordagem conhecida por Mínimos Quadrados Pesados - MQP - sendo a sua solução obtida substituindo ε pela expressão obtida a partir de (1). Este problema de minimização é resolvido formulando o sistema de equações não lineares (10) traduzindo as condições de estacionaridade respectivas. Nesta expressão H representa a matriz do Jacobiano das medidas. Este sistema de equações pode ser resolvido utilizando o método iterativo de Newton-Raphson.

$$H(X)^T R^{-1} [Z - h(X)] = 0 \quad (10)$$

Existem muitas técnicas descritas na literatura [1] para resolver este problema. As mais usuais e bem estudadas correspondem a versões completas do método de equações normais e à sua formulação desacoplada, resolvidas utilizando o método dos mínimos quadrados ou o método dos mínimos absolutos. Para além destas, são conhecidas versões mais específicas. Por exemplo, a referência [2] descreve uma técnica apropriada para resolver problemas de estimação de estado em redes de distribuição integrando medidas de correntes. Nesta abordagem os valores das medidas são convertidos em correntes sendo o algoritmo de estimação de estado adaptado tendo em conta este aspecto.

4. Integração de Medidas Imprecisas

Neste ponto apresenta-se de uma forma resumida um algoritmo de resolução do problema de estimação de estado em que se consideram medidas representadas por números imprecisas. Para mais informação sobre este algoritmo aconselha-se a consulta das referências [3, 4].

O problema de estimação de estado considerando que, pelo menos uma medida, é modelizada como um número impreciso pode ser resolvido de um modo eficiente linearizando as funções $h(X)$. De uma forma resumida, o algoritmo desenvolvido divide-se em duas grandes fases. Na primeira fase, o problema de estimação de estado é resolvido considerando apenas medidas assumindo valores determinísticos por forma a identificar o ponto de linearização. Nesta fase, identifica-se também o estado dos ramos do sistema tendo em conta que as variáveis D_{ij} apenas assumem valores determinísticos. O resultado deste estudo inicial será utilizado na segunda fase para linearizar as funções $h(X)$ e, deste modo, reflectir nos resultados a incerteza presente nos dados.

Consideremos que o vector de medidas Z é conhecido, e que este vector contém pelo menos uma medida modelizada como um número impreciso, como por exemplo o número representado na figura 1. Uma

representação deste tipo pode ser interpretada como reflectindo a incerteza associada ao intervalo de valores que uma grandeza pode assumir. Os valores pertencentes ao intervalo $[a_2, a_3]$ - corte de nível 1.0 - possuem grau de pertença máximo no sentido em que apresentam um grau de compatibilidade elevado com o conhecimento qualitativo associado a essa grandeza. Valores inferiores a a_1 ou superiores a a_4 não possuem qualquer compatibilidade com esse conhecimento possuindo, portanto, grau de pertença 0.0.

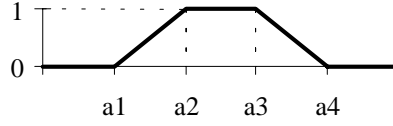


Figura 1 - Número impreciso trapezoidal.

Um vector de medidas rígidas Z_1 pode ser obtido a partir de Z se as medidas imprecisas forem substituídas pelos valores médios dos cortes de nível 1.0 respectivos - Valores Centrais. O novo vector assim obtido, Z_1 , é utilizado para resolver um problema de estimação de estado clássico permitindo calcular um vector de estado X_1 que é usado como ponto de linearização. Para resolver este problema utiliza-se o processo iterativo baseado no algoritmo clássico das equações normais (10).

A imprecisão que afecta diversas variáveis de estado pode ser obtida utilizando a equação (11) em que X_1 representa o vector de estado determinístico calculado na primeira fase do algoritmo. Nesta equação utiliza-se a matriz do ganho G obtida na última iteração do processo de estimação de estado clássico referido anteriormente.

$$X = X_1 + (G^{-1} H^T R^{-1}) (Z - h(X_1)) \quad (11)$$

Para além das variáveis de estado o operador de um DMS pode estar interessado em conhecer o comportamento de outras variáveis, tais como os trânsitos de potências ou as correntes. O cálculo destas grandezas não deverá ser realizado utilizando os valores imprecisos das variáveis de estado calculadas pelo algoritmo descrito anteriormente (do ponto de vista aritmético estas operações são possíveis, mas os resultados obtidos corresponderiam a uma propagação incorrecta de incerteza). Este problema pode ser ultrapassado construindo as funções de pertença destas grandezas directamente a partir dos valores das medidas. Para este efeito, a função F_{ij} , representativa dos trânsitos de potência activa (P_{ij}), reactiva (Q_{ij}) ou correntes (I_{ij}) no ramo ij , deverá ser linearizada considerando-se apenas os primeiros termos do desenvolvimento em série de Taylor em torno do ponto X_1 .

$$\Delta F_{ij} \cong \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial \theta_i} \right|_{X_1} \Delta \theta_i + \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial \theta_j} \right|_{X_1} \Delta \theta_j + \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial V_i} \right|_{X_1} \Delta V_i + \left. \frac{\partial F_{ij}}{\partial V_j} \right|_{X_1} \Delta V_j \quad (12)$$

As derivadas de P_{ij} , Q_{ij} e I_{ij} podem ser organizadas numa matriz $J_{FL}(X)$, sendo cada linha formada pelas derivadas de uma destas grandezas em relação a cada componente do vector de estado. Desta forma, a partir do vector dos acréscimos imprecisos do vector de estado podem ser calculados os acréscimos imprecisos para os valores dos fluxos $FL(X_1)$ calculados a partir de X_1 (13).

$$FL = FL(X_1) + (J_{FL}(X_1) (G^{-1} H^T R^{-1})) (Z - h(X_1)) \quad (13)$$

Note-se que no cálculo do vector de estado impreciso e dos fluxos de potências e correntes nos ramos é utilizada a informação obtida na primeira fase do algoritmo relativa aos ramos que se encontram em serviço. Para as linhas que não se encontram em serviço estes fluxos têm o valor zero.

5. Exemplos de Aplicação

A metodologia descrita foi utilizada para realizar exercícios de estimação de estado em relação à rede eléctrica representada na figura 2 que se baseia no sistema eléctrico da Ilha da Madeira (os dados podem

ser fornecidos pelos autores). Neste esquema assinalam-se os locais em que se realizam medidas telemetradas (a fundo escuro) e os que correspondem a informação de natureza qualitativa a incluir no modelo (a fundo claro). A tracejado encontram-se representados 6 ramos cujo estado - em serviço ou fora de serviço - não é conhecido de forma inequívoca. Em relação a este sistema foi realizado um exercício de estimação de estado em que foram especificados números imprecisos trapezoidais para as medidas afectadas por imprecisão cujos cortes de nível 0 e 1 correspondem a intervalos de $\pm 10\%$ e de $\pm 5\%$ em relação ao valor central.

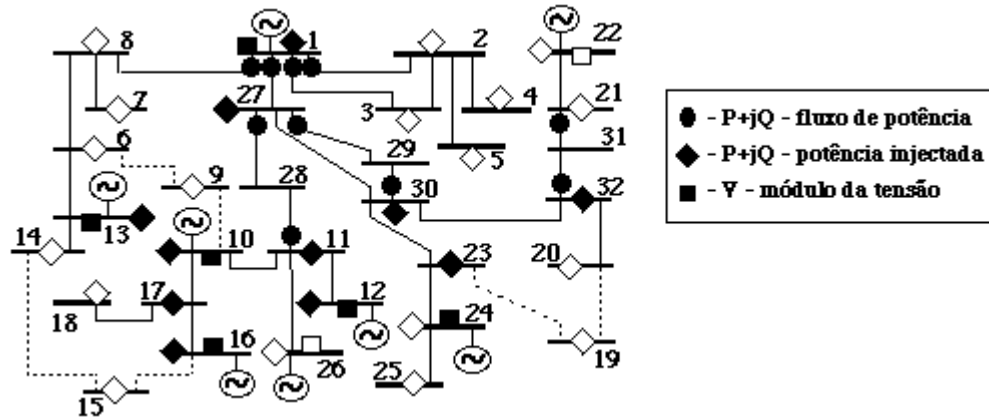


Figura 2 - Esquema reduzido da rede eléctrica da Ilha da Madeira.

O exercício de estimação de estado referido permite concluir que, de entre os ramos a tracejado, os ramos 15-16, 6-9 e 19-23 se encontram em serviço e os ramos 14-15, 9-10 e 19-20 se encontram fora de serviço. Na figura 3 apresentam-se dois gráficos com as funções de pertença dos números imprecisos associados aos módulos das tensões nos barramentos 22 e 26. Nestes gráficos representam-se a traço fino as funções de pertença das medidas imprecisas, e a traço grosso as funções do vector de estado. Note-se que a imprecisão que existia nos dados foi diminuída ao passar dos valores medidos para o cálculo do vector de estado. Esta diminuição é explicada pelo facto de tendo em conta o conjunto de medidas especificadas - telemetradas e afectadas por imprecisão - se concluir que valores inicialmente considerados admissíveis para estas últimas se revelarem, afinal, incoerentes com os restantes dados.

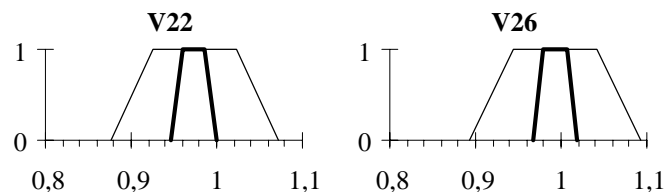


Figura 3 - Funções de pertença das medidas e dos resultados das tensões nos barramentos 22 e 26.

Por outro lado, a qualidade dos resultados obtidos foi avaliada comparando as funções de pertença obtidas utilizando o algoritmo descrito com as funções de pertença construídas utilizando um algoritmo baseado no método do gradiente. Nesta abordagem, a função de pertença de cada grandeza foi construída minimizando ou maximizando o seu valor para um dado nível de incerteza pertencente ao intervalo $[0, 1]$. Estes problemas de optimização integram como restrições as equações (10) e desigualdades que limitam os valores das medidas afectadas por incerteza ao nível α pretendido.

As funções de pertença obtidas por estes dois processos foram comparadas utilizando três critérios - Remoção, Valor Central e Amplitude - que se encontram descritos em [6] e que foram já utilizados em [3, 4]. Como se pode verificar analisando os resultados apresentados na tabela I o algoritmo descrito nesta comunicação permite caracterizar com qualidade elevada a incerteza que afecta os resultados do processo de estimação de estado se os resultados foram comparados com os obtidos pelo algoritmo alternativo descrito. Deve assinalar-se que esse algoritmo alternativo é muito mais pesado do ponto de vista computacional visto que exige, para cada grandeza cuja função de pertença se pretende construir, a resolução de diversos problemas de optimização não linear. A metodologia desenvolvida revela-se deste

ponto de vista muito económica já que exige, apenas, a resolução de um estudo inicial de estimação de estado e a realização, em seguida, de um conjunto de cálculos de natureza não iterativa.

	Removal		Valor Central		Amplitude	
	média (%)	max. (%)	média (%)	max. (%)	média (%)	max. (%)
V	0.003	0.007	0.001	0.003	0.006	0.020
θ	0.005	0.013	0.113	0.543	0.304	4.167
P	0.002	0.009	0.025	0.498	0.026	0.178
Q	0.002	0.011	0.058	0.990	0.044	0.248
I	0.241	1.970	0.107	1.124	0.243	2.665
média	0.051		0.061		0.123	

Tabela I - Erros relativos médio e máximo dos resultados obtidos.

6. Conclusões

Nesta comunicação foi apresentada uma formulação do problema de estimação de estado especialmente adaptada à utilização em redes de distribuição de energia. Esta formulação combina de forma inovadora três tipos de informação: valores de medidas telemetradas existentes na base de dados do SCADA, valores de grandezas afectados por imprecisão e informação relativa ao estado de aparelhagem de corte traduzida por variáveis binárias associadas ao facto dos ramos da rede se encontrarem, ou não, em serviço. Esta modelização visa, assim, dar resposta a algumas preocupações presentes nos centros de condução de redes de distribuição contribuindo para que os modelos disponíveis traduzam de forma mais fiel as características destas redes, se encontrem mais adaptados aos dados disponíveis e se aproximem da realidade vivida nessas redes. Assim, é nossa convicção que formulações deste tipo podem vir a ser integradas em metodologias de estimação de estado em sistemas de DMS. Este trabalho insere-se nesta linha de acção que, não duvidamos, poderá, no futuro, contribuir para dar resposta a estes problemas.

Referências

- [1] M.B. Do Coutto Filho, A.M. Leite da Silva, 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, W.-H.E. Liu, "Distribution System State Estimation", Proceedings of IEEE/PES 1994 Winter Meeting, New York, 1994.
- [3] V. Miranda, J. Pereira, J.T. Saraiva, "Experiences in State Estimation Models for Distribution Systems Including Fuzzy Systems", Proceedings of Stockholm Power Tech, SPT 95, Stockholm, Sweden, June 1995.
- [4] V. Miranda, J. Pereira, J.T. Saraiva, "State Estimation in DMS - Combining Fuzzy Information and Measurements", Proceedings of CIRED 96, Buenos Aires, Argentina, December 1996.
- [5] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and Control, pp. 338 - 353, August 1965.
- [6] A. Kaufmann, e M.M. Gupta, "Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science", North Holland ed., 1988.
- [7] V. Miranda, M. Matos, 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, L.M.V.G. Pinto, "Impact on Some Planning Decisions From a Fuzzy Modelling of Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, no. 2, May 1994.
- [9] J.T. Saraiva, V. Miranda, 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.
- [10] J.T. Saraiva, V. Miranda, "Identification of Hedging Policies in Generation/Transmission Systems", Power Systems Computation Conference, PSCC 96, Dresden, August 1996.

Agradecimento - O trabalho descrito nesta comunicação foi parcialmente financiado pelo contrato PRAXIS 2/2.1/TIT/1634/95