

DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA UTILIZANDO ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES

MICHEL MOACIR ARANTES GONÇALVES*, LEANDRO RODRIGUES MANSO SILVA†, DANTON DIEGO FERREIRA*, CARLOS AUGUSTO DUQUE‡, BELISARIO NINA HUALLPA*

**Departamento de Engenharia DEG / UFLA
Lavras, Minas Gerais, Brasil*

†*Faculdade de Engenharia Elétrica UFJF
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil*

‡*Departamento de Engenharia DEG / UFLA
Lavras, Minas Gerais, Brasil*

§*Faculdade de Engenharia Elétrica UFJF
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil*

¶*Departamento de Engenharia DEG / UFLA
Lavras, Minas Gerais, Brasil*

michelmoacircm@hotmail.com, leandro.manso@engenharia.ufjf.br, danton@deg.ufla.br,
caduque62@gmail.com, belisario.nina@deg.ufla.br

Abstract— Alternative sources of energy emerged by the necessity of solving environmental problems, dealing with rising energy prices and also with the costs of plants maintenance and construction. Such alternative sources, which are part to distributed generation, may have suffered from some problems that did not exist before in the electric power system. One of the problems generated by the use of distributed generation is the occurrence of non programmed island, caused by adverse operations in the power system. This event can, result in serious accidents to technicians that are working to solve the problem of lack of electricity, and generate problems to electrical system. In this context, the present work to detect unintentional islands uses ICA to perform such detection. By using higher-order statistics-based features, it was possible to detect islands as well as to classify events associated to generator distributed with rates of 100% right hit for islanding.

Keywords— Distributed generation, Protection, Islanding detection, Electrical power systems, Independent component analysis.

Resumo— Fontes alternativas de energia surgiram pela necessidade de se resolver problemas ambientais, lidar com o aumento dos preços da energia e também com os custos de manutenção e construção de usinas. Tais fontes alternativas, que integram a geração distribuída, também trouxeram alguns problemas antes inexistentes para o sistema elétrico de potência. Um dos problemas gerados pela utilização de gerações distribuídas é o surgimento de ilhamentos não programados, gerados por falhas adversas no sistema elétrico de potência. Este fenômeno pode por exemplo, resultar em ferimentos graves para os técnicos que estão tentando resolver o problema de falta de energia, e também gerar problemas técnicos no sistema elétrico. Nesse contexto, o presente trabalho para detecção de ilhamentos não intencionais utiliza ICA para realizar tal detecção. Utilizando recursos baseados em estatísticas de ordem superior, foi possível detectar ilhamentos, assim como classificar os eventos associados a geração distribuída, com taxas de 100 % de acertos para ilhamento.

Palavras-chave— Geração distribuída, Proteção, Detecção de ilhamento, Sistemas elétricos de potencia, Análise de componentes independentes.

1 Introdução

A inserção da geração distribuída (GD) nos sistemas de distribuição de energia elétrica possui muitas vantagens, incluindo a redução de perdas na linha pela proximidade com as unidade consumidoras, a redução da necessidade e a dependência da geração de energia utilizando combustíveis fósseis e aumento da confiabilidade dos sistemas de distribuição. No entanto, o crescimento dessas formas alternativas de energia e a sua integração através da geração distribuída nos sistemas de energia elétrica também trouxeram consigo o surgimento de problemas como os ilhamentos não intencionais (Faqrudin et al., 2012).

O ilhamento é uma condição em que parte da

rede de distribuição é desconectada do sistema, e as unidades consumidoras ainda são alimentadas por um ou mais (GDs) conectadas a ela. Alguns dos mais importantes problemas que a operação ilhada dos geradores distribuídos pode trazer ao sistema são (Walling e Miller, 2002):

- Ameaça à segurança dos técnicos que operam e realizam a manutenção dos sistemas elétricos, uma vez que após a desconexão com a rede principal, parte da rede elétrica permanece energizada sem o conhecimento dos mesmos;
- A concessionária, usualmente, não tem controle de parâmetros como tensão e frequência dentro do sistema ilhado;

- Os dispositivos de proteção contra curtos-circuitos existentes dentro da ilha podem perder completamente a coordenação;
- O subsistema ilhado pode apresentar aterramento inadequado para sua operação;
- Ilhas energizadas podem interferir na restauração manual ou automática do suprimento de energia aos consumidores.

Em geral, as técnicas de detecção de ilhamento foram desenvolvidas para diferentes tipos de GD, onde as mais comuns são as GDs constituídas de inversores e GDs síncronas (Mulhausen et al., 2010). Tais técnicas podem ser divididas em quatro categorias principais: técnicas ativas, técnicas passivas, técnicas híbridas e técnicas baseadas na comunicação.

As técnicas passivas de detecção de ilhamento medem diferentes parâmetros do sistema, tais como tensão, frequência, impedância e distorção harmônica no ponto de acoplamento comum (PAC) e compara-os com limiares pré-especificados e define se houve ou não um evento de ilhamento. Tais limiares podem ser obtidos também, após o processamento dos parâmetros do sistema.

A principal desvantagem das técnicas passivas são as grandes zonas de não-deteção (ZND) que são casos onde o método utilizado não consegue detectar o ilhamento. O tipo de GD é um fator que pode ser determinante na ZND, um exemplo são geradores do tipo inversor, que a todo tempo fazem o monitoramento da rede e perdem sua referência no momento em que o sistema fica ilhado, o que acaba sendo transmitido para os parâmetros de saída da GD.

Existem muitas técnicas de detecção de ilhamento passivas, como por exemplo, sobre/subtensão (Ropp et al., 2000) sobre/subfrequência (Zeineldin e Jr., 2009), taxa de variação da frequência (ROCOF) (Freitas et al., 2005), taxa de variação da potência (ROCOP) (Redfern et al., 1993) e distorção harmônica total da corrente (Jang e Kim, 2004).

As técnicas de detecção de ilhamento ativas são baseadas no conceito de inserção, intencional, de um pequeno distúrbio no sistema e com base no efeito causado, é detectado quando ocorre o ilhamento. Sob condição de não-ilhamento, o efeito causado dessa perturbação será insignificante e não causará uma grande modificação nas condições normais de operação. No entanto, sob condição de ilhamento, esta perturbação resultará em uma grande alteração nos parâmetros do sistema devido à ausência da rede (Faqhrudin et al., 2012).

A vantagem das técnicas de detecção de ilhamento ativas é a pequena ZND, no entanto, essas técnicas têm problemas com a qualidade da

energia, que fica prejudicada pela interferência do distúrbio aplicado no sistema.

Algumas das técnicas de detecção de ilhamento ativas são: o deslocamento de frequência de modo deslizante (Zeineldin e Salama, 2011), derivação de frequência ativa (Yafaoui et al., 2012), injeção de corrente (Karimi et al., 2008) e frequência e método de alteração de tensão (Lopes e Sun, 2006).

Para as técnicas Híbridas tem-se duas ou mais técnicas ativas e passivas trabalhando de forma conjunta pra realizar a detecção onde, a técnica ativa só entra em atividade após uma suspeita de ilhamento realizada pela técnica passiva. Já as técnicas remotas baseiam-se na comunicação entre centrais de monitoramento e GDs.

Embora essas técnicas possam ter uma melhor confiabilidade do que as técnicas locais, elas possuem um custo elevado de implementação. Algumas das técnicas de detecção de ilhamento remotas são: esquema de sinalização por linhas de transmissão e esquema de comunicação sem fio (Chandra Shekhar Chandrakar, 2012).

A figura 1 traz um diagrama para determinar os diferentes métodos de detecção de ilhamento e como eles se subdividem em sub-tópicos específicos.

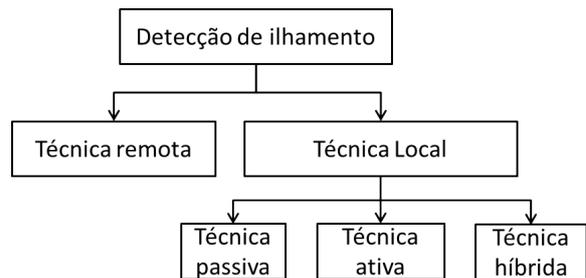


Figura 1: Diagrama representando as Técnicas de detecção de ilhamento

Nesse estudo será abordado a técnica de análise de componentes independentes (ICA). Através das ferramentas de extração de características aplicadas na resposta retornada pelo ICA e utilizando valores limiares pode-se caracterizar a existência ou não de ilhamento ou até mesmo evidenciar outro tipo de problema de qualidade de energia. A dificuldade das técnicas passivas é justamente a escolha desse limiar para que o ilhamento não seja confundido com outro tipo de distúrbio, como afundamento de tensão, por exemplo. Esses valores limiares podem passar através de um classificador e assim definir as classes de evento existentes e quando cada uma dessas classes ocorreu.

O objetivo aqui será aplicar essas técnicas nos casos de afundamento de tensão falta monofásica e ilhamento, e através de um limiar pré-estabelecido, identificar tais eventos.

Na segunda seção será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema utilizado nesse estudo. Na terceira seção será mostrada a modelagem do sistema teste. Na quarta seção será mostrado a metodologia aqui utilizada bem como uma discussão sobre os resultados obtidos e por último, na quinta seção, será feito uma conclusão desse trabalho.

2 Base Teórica

Nessa seção são apresentados tópicos base para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Análise de componentes independentes

Na análise de componentes independentes (ICA, do inglês *Independent Component Analysis*), O modelo de mistura consiste em ‘ n ’ dados observáveis x_1, \dots, x_n resultam de uma combinação linear de N componentes aleatórias s_1, \dots, s_n , juntamente com uma matriz de mistura A , estatisticamente independentes entre si, cuja forma pode ser descrita como:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s} \quad (1)$$

Essa matriz de mistura contém coeficientes da forma a_{ij} que realizam uma ponderação na mistura dos sinais (como por exemplo, distância do microfone ou o tempo de propagação do som em um sinal de captação de áudio). Pode-se então dizer que tais coeficientes de ponderação são desconhecidos, já que não é possível determinar seus valores sem conhecer as características físicas exatas do ambiente teste. O problema então consiste na determinação da matriz de separação \mathbf{W} ($\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$) (Carmo e Vasconcelos, 2007). Diversos algoritmos podem ser utilizados no ICA dentre estes, o SOBI (Hyvarinen, 1999) que será discutido a seguir.

2.1.1 Second-Order Blind Identification (SOBI)

Este algoritmo foi originalmente proposto por (Belouchrani et al., 1997). É mais apropriado classificar o SOBI como um algoritmo para separação cega de fontes do que como ICA propriamente dito, uma vez que não visa separar sinais em sinais independentes, mas em sinais não correlacionados. Este algoritmo assume que as fontes dos sinais possuem funções de autocorrelação não nulas e são mutuamente não correlacionadas. Portanto, o algoritmo tenta diagonalizar matrizes de covariância com vários atrasos de tempo:

$$E[x(t + \tau)x(t)^T], \tau = 0, 1, 2... \quad (2)$$

Para esse trabalho em questão o algoritmo SOBI receberá como matriz de misturas o sinal trifásico de um sistema teste com uma geração distribuída,

a rede principal e uma carga conectada, e retornara as componentes independentes do sinal de maneira que através de um extrator de características essas componentes independentes poderão descrever a existência ou não de ilhamentos não intencionais.

2.2 Curtose

Em estatística descritiva, a curtose é uma medida de forma que caracteriza o achatamento da curva da função de distribuição de probabilidade. A curtose da distribuição normal é 3. Se o valor é > 0 (ou > 3), então a distribuição em questão é mais alta (afunilada) e concentrada que a distribuição normal; se o valor é < 0 (ou < 3), então a função de distribuição é mais "achatada" que a distribuição normal.

A curtose de uma distribuição é definida como:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{E}(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (3)$$

Onde μ é a média de x , σ é o desvio padrão de x , e \mathbf{E} representa o valor esperado. O matlab tem essa função com o nome de *kurtosis*. Para este trabalho a curtose é responsável por extrair características da resposta retornada pelo SOBI.

3 Modelagem do sistema

O presente trabalho visa analisar o sinal de tensão trifásica no ponto de acoplamento comum (PAC) entre o gerador distribuído e o sistema, utilizando técnicas de processamentos estatístico, a fim de detectar ilhamento e e também eventos de afundamento de tensão.

Para a obtenção dos sinais de tensão trifásica foi utilizado o sistema de potência de 1 barra que se encontra em ambiente de simulação Matlab/Simulink com um GD do tipo inversor. O diagrama unifilar desse sistema pode ser visualizado na figura 2.

O ilhamento neste sistema é caracterizado, em linhas gerais, quando a rede é retirada do sistema e o gerador distribuído continua conectado ao mesmo. Nesse caso, o gerador estará fornecendo energia para uma parte do sistema que não está conectada à subestação, ou seja, estará operando em modo "ilhado".

4 Metodologia

Os procedimentos adotados neste estudo estão representados pela figura 3.

Com a finalidade de simular situações de ilhamento, foi inserida uma chave entre a subestação e o ponto de acoplamento comum, a qual abrirá sempre na metade do tempo definido para simulação. O tempo simulado foi de 0,1 segundos.

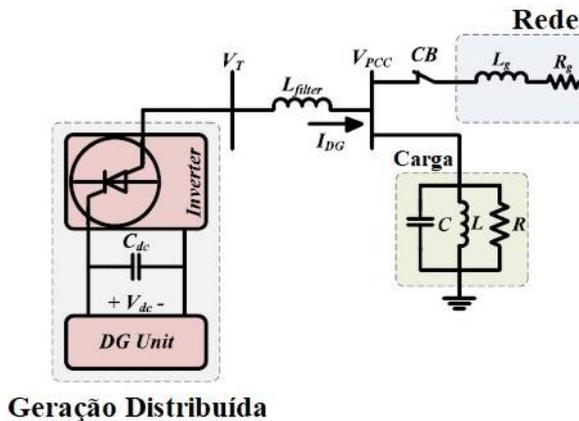


Figura 2: Diagrama unifilar do sistema uma barra

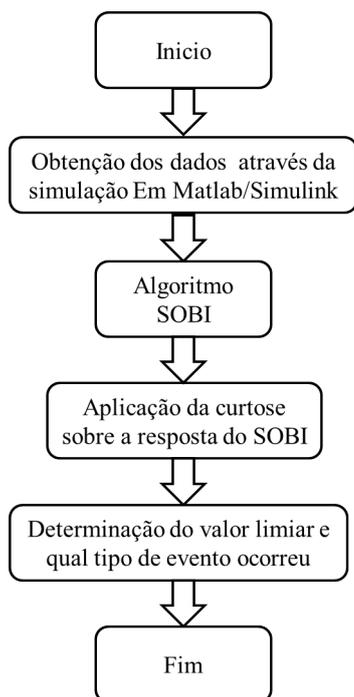


Figura 3: Fluxograma dos procedimentos adotados

O afundamento de tensão ocorre, geralmente, quando há a inserção de uma carga, relativamente grande, em algum lugar do sistema de potência. Após essa inclusão de carga, a queda de tensão é justificada devido ao aumento da demanda de carga (e corrente), o que aumenta a queda de tensão nas linhas e, conseqüentemente, reduz a tensão nas barras, desequilibrando o sistema.

Para simular essa situação, foi inserido no sistema uma carga a qual simboliza uma grande máquina. Essa “máquina” foi introduzida com diferentes porcentagens de carga. A porcentagem de carga foi escolhida de maneira aleatória seguindo uma distribuição uniforme. Os valores variam de 50 a 150%. A carga é inserida na metade do tempo definido para simulação e permanece até o fim.

A tensão trifásica é monitorada no PAC, pois é a barra onde o gerador distribuído está conectado. A forma de onda dessa tensão é coletada, para cada situação de carga, para fazer a análise através do SOBI e extrair características das mesmas para ambos os casos.

5 Resultados

O valor da tensão trifásica é estável com frequência constante de 60Hz antes da ocorrência do evento que foi inserido na metade do tempo de simulação, como pode ser visto nas figuras 4, 5 e 6.

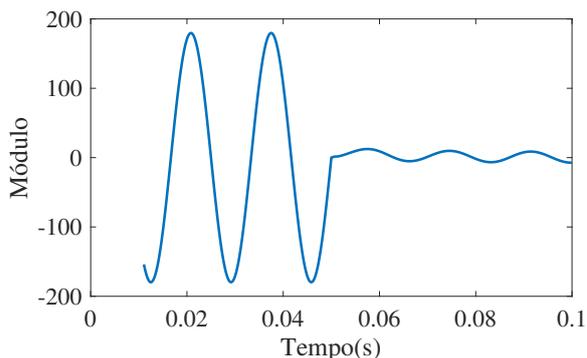


Figura 4: Tensão uma das fases condição de falta

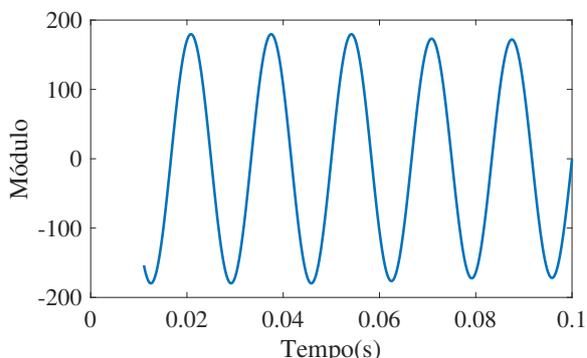


Figura 5: Tensão uma das fases condição de ilha

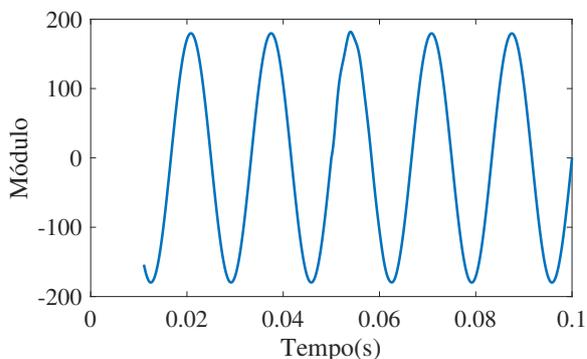


Figura 6: Tensão uma das fases condição de afundamento

As figuras 4, 5 e 6 trazem o sinal de tensão de uma das fases para três problemas distintos, falta, ilhamento e afundamento, apesar disso as figuras 5 e 6 são extremamente semelhantes, seja em amplitude ou em frequência, isso foi feito de forma proposital pois para a condição de carga específica em que as figuras foram tiradas o ilhamento é imperceptível em uma análise qualitativa.

Como a entrada apresentada ao ICA é trifásica, ele dá na saída 3 componentes. Como foi utilizado o SOBI, ele ordena as componentes de saída da componente de maior energia para a de menor, sendo assim experimentalmente observou-se que a terceira, que é a de menor energia é a que, discrimina, eventos de ilhamento. Vale ressaltar que o desempenho do método em relação a qual componente foi escolhida para identificar ilhamentos conforme os testes até então realizados, não apresenta relação com as características da rede, como nível de curto-circuito.

Com base nisso para todas as condições de carga, e para todos os tipos de eventos (afundamento, ilhamento, falta) extraiu-se a terceira componente e posteriormente cada uma dessas componentes foram projetadas para o espaço das observações a fim de recuperar as amplitudes, através da equação:

$$Y = \mathbf{H}_{(1,i)} \mathbf{S}_i \quad (4)$$

Onde \mathbf{S}_i representa uma estimativa da matriz de misturas e $\mathbf{H}_{(1,i)}$ uma estimativa das fontes originais.

As figuras 7, 8 e 9 mostram as amostras projetadas.

Analisando as figuras 7, 8 e 9, para uma condição de carga específica e para diferentes eventos, fica visível a distinção entre os padrões retornados pelo SOBI.

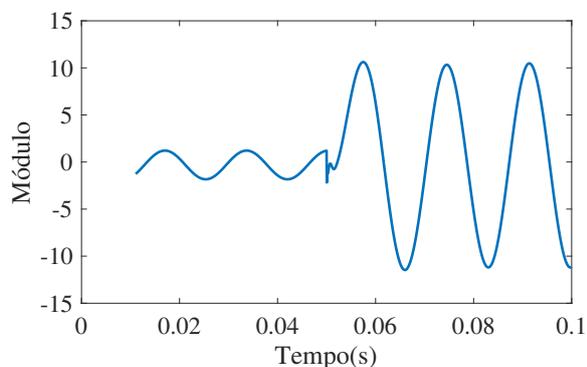


Figura 7: Terceira componente na amplitude original da condição de falta

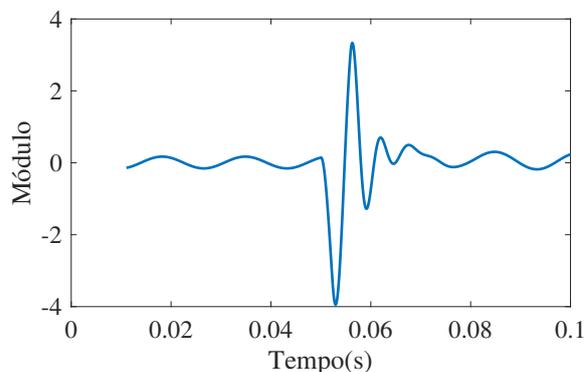


Figura 8: Terceira componente na amplitude original da condição de ilha

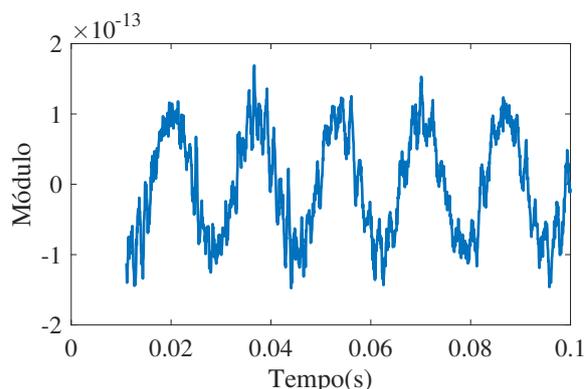


Figura 9: Terceira componente na amplitude original da condição de afundamento

Para validar o resultado de uma forma qualitativa, utilizou-se a curtosis para extrair características da terceira componente do ICA e realizar a separação das amostras em grupos distintos. No total são 81 amostras distribuídas igualmente entre os 3 tipos de evento como exibido na figura 10, onde cada símbolo representa um evento distinto.

Na figura 10 os pontos representados por 'o' são eventos de ilhamento, falta é representado por pontos com '+' e afundamentos por pontos em 'x'. A escolha do valor limiar foi feita de forma empírica pela maneira com que os dados ficaram separados, essa não é a maneira ideal para determinação do limiar de separação uma vez que poderia ser utilizado máquina de vetor de suporte (SVM), redes neurais artificiais (RNA) ou algum outro método de classificação mas tais métodos aumentariam a complexidade do sistema teste uma vez que já foram utilizados ICA e a curtose.

Um importante aspecto de métodos para detecção de ilhamento se refere ao tempo de atuação na remoção dos geradores distribuídos da rede na situação ilhada, visto que este ilhamento pode ser decorrente da atuação de religadores. Deste modo, caso o método não seja rápido o suficiente para atuar antes que o religador energize a rede, o gerador presente no sistema previamente ilhado

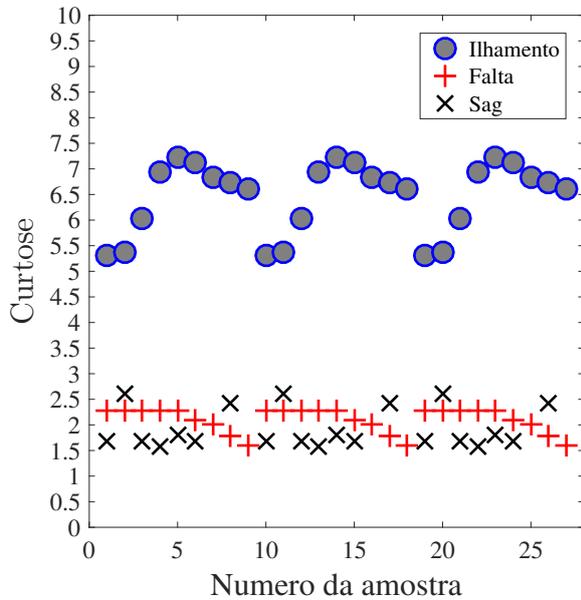


Figura 10: Separação das amostras em grupos

pode ser danificado por falta de sincronismo com a rede.

Uma alternativa para redução da complexidade do método e o tempo de processamento seria definir uma matriz de misturas geral que pudesse ser armazenada e aplicada as amostras de teste a fim de identificar novos eventos por meio de um limiar. A utilização de um limiar de forma empírica foi suficiente para uma análise de viabilidade do método. Um valor limiar de 5 foi suficiente para definir a separação linear das amostras como na figura 10. Vale destacar que os eventos de ilhamento ficaram isolados dos demais eventos.

Para os demais eventos do SEP utilizando um valor limiar em 2 não foi possível classificar corretamente todas as amostras chegando a identificar para um total de 27 faltas 6 como afundamento. Tais resultados podem ser conferidos através da Tabela 1, que define os eventos testados e os eventos detectados.

Tabela 1: Numero de eventos testados e detectados

		Eventos detectados		
		Ilhamento	Sag	Falta
eventos testados	Ilhamento	27	0	0
	Sag	0	18	9
	Falta	0	6	21

Do numero total de amostras para cada tipo de evento, pode-se ver que a técnica do ICA foi capaz de realizar a detecção em 100% dos casos de ilhamento, considerando apenas a curtose como valor limiar. Já a classificação de falta e afundamento não foi feita de maneira satisfatória uma vez que utilizando apenas a curtose o valor limiar entre os dois ficou muito próximo demonstrando

um erro de até 33.3% na classificação de eventos de afundamento com relação a falta.

Tabela 2: Porcentagem de acertos na classificação de eventos

Situação	Porcentagem de eventos classificados de forma correta
Ilhamento	100%
Sag	77.7%
Falta	22,2%

6 Conclusões

A utilização de ICA se mostrou um método interessante para avaliações iniciais de sua utilização na detecção de ilhamentos. As técnicas aqui aplicadas foram feitas em simulações offlines e aliadas as técnicas de extração de características foi possível estimar com certeza a existência de ilhamentos no SEP. A ineficiência na classificação dos demais eventos talvez possa ser atribuída a utilização da curtose. Uma sugestão para trabalhos futuros seria a implementação de tal método em um sistema real online e até mesmo uma patente relacionada.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq e à Fapemig que apoiaram esse trabalho.

Referências

- Belouchrani, A., Abed-Meraim, K., Cardoso, J. F. e Moulines, E. (1997). A blind source separation technique using second-order statistics, *IEEE Transactions on Signal Processing* **45**(2): 434–444.
- Carmo, S. K. S. e Vasconcelos, L. G. S. (2007). Aplicação da análise de componentes independentes (ICA) no controle de uma coluna de destilação de alta pureza, pp. 1–8.
- Chandra Shekhar Chandrakar, Bharti Dewani, D. C. (2012). An Assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods, *International Journal of Advances in Engineering & Technology* **5**(1): 218–226.
- Faqhrudin, O. N., El-Saadany, E. F. e Zeineldin, H. H. (2012). Naive bayesian islanding detection technique for distributed generation in modern distribution system, *2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, pp. 69–74.
- Freitas, W., Xu, W., Affonso, C. M. e Huang, Z. (2005). Comparative analysis between rocof

- and vector surge relays for distributed generation applications, *IEEE Transactions on Power Delivery* **20**(2): 1315–1324.
- Hyvarinen, A. (1999). Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis, *IEEE Transactions on Neural Networks* **10**(3): 626–634.
- Jang, S.-I. e Kim, K.-H. (2004). An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current, *IEEE Transactions on Power Delivery* **19**(2): 745–752.
- Karimi, H., Yazdani, A. e Iravani, R. (2008). Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit, *IEEE Transactions on Power Electronics* **23**(1): 298–307.
- Lopes, L. A. C. e Sun, H. (2006). Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **21**(1): 171–180.
- Mulhausen, J., Schaefer, J., Mynam, M., Guzmán, A. e Donolo, M. (2010). Anti-islanding today, successful islanding in the future, *Protective Relay Engineers, 2010 63rd Annual Conference for, IEEE*, pp. 1–8.
- Redfern, M. A., Usta, O. e Fielding, G. (1993). Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit, *IEEE Transactions on Power Delivery* **8**(3): 948–954.
- Ropp, M. E., Begovic, M., Rohatgi, A., Kern, G. A., Bonn, R. H. e Gonzalez, S. (2000). Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **15**(3): 290–296.
- Walling, R. e Miller, N. (2002). Distributed generation islanding-implications on power system dynamic performance, *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, Vol. 1, IEEE, pp. 92–96.
- Yafaoui, A., Wu, B. e Kouro, S. (2012). Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Power Electronics* **27**(5): 2367–2375.
- Zeineldin, H. H. e Jr., J. L. K. (2009). Performance of the ovp/uvp and ofp/ufp method with voltage and frequency dependent loads, *IEEE Transactions on Power Delivery* **24**(2): 772–778.
- Zeineldin, H. H. e Salama, M. M. A. (2011). Impact of load frequency dependence on the ndz and performance of the sfs islanding detection method, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **58**(1): 139–146.