

Incremento de la continuidad mediante la localización de fallas monofásicas

Víctor A. Barrera-Núñez^a, Gilberto Carrillo-Caicedo^b,
Juan J. Mora-Flórez^{c*}

(a) *Universitat de Girona, España*

(b) *Universidad Industrial de Santander, Colombia*

(c) *Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia*

*jjmora@utp.edu.co

(Recibido: Noviembre 8 de 2007 - Aceptado: Abril 18 de 2008)

RESUMEN

En este artículo se propone una alternativa de mejoramiento a la continuidad del suministro de energía eléctrica en sistemas de distribución, a partir de la aplicación de una técnica basada en inteligencia artificial y aprendizaje estadístico, para localización de fallas monofásicas. La metodología que se propone requiere una mínima inversión por parte de los operadores de red, ya que sólo es necesaria la medición de las señales de tensión y corriente en la cabecera del circuito principal. La información que utiliza la herramienta para la localización de la falla es la adquirida por los equipos de registro instalados en la cabecera de los circuitos principales, además de la configuración y demás parámetros del sistema de distribución. A partir de la aplicación de la metodología propuesta para la identificación y localización de fallas monofásicas en sistemas de distribución, se esperan resultados como: la reducción de los índices referentes a la duración (T) y número de interrupciones (N) del suministro de energía eléctrica, establecidos por los entes reguladores de energía de cada país.

PALABRAS CLAVE: Calidad de potencia, clasificación multivariable, continuidad del suministro de energía eléctrica, indicadores de calidad, inteligencia artificial, localización de fallas.

Continuity increase by single phase faults location

ABSTRACT

This paper proposes an alternative for improving the electric energy service continuity in distribution systems, from the application of an artificial intelligence-based technique and statistical learning for locating single phase faults. The proposed methodology demands a minimum investment from utilities since it only requires measurements of voltage and current at the substation. The information used by the tool for the estimation of the single phase fault location comprises data acquired by recorders installed in the substation end of feeders, network configuration and other parameters of the distribution system. From the application of the proposed methodology, results like the reduction of duration (T) and number of interruptions (N) indexes of the supply of electric energy established by regulating entities, are expected.

KEYWORDS: Power quality, multivariable classification, service continuity, artificial intelligence, fault location.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de los nuevos esquemas de regulación del sector eléctrico a nivel mundial, el problema de la calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica se ha convertido en un tema de especial interés para las empresas distribuidoras y operadores de red [1].

En los sistemas de transmisión, la localización de fallas es relativamente sencilla debido a las características de las líneas, ya que existen medidas en los dos terminales de las mismas, con las cuales se estima la impedancia de falla vista desde la subestación [2]. El caso contrario se presenta en los sistemas de distribución, donde la localización no es una tarea simple, debido a la topología del sistema; presencia de ramales monofásicos, bifásicos y trifásicos; cargas monofásicas y trifásicas a lo largo del alimentador; líneas sin transposiciones, entre otras [3].

A pesar que se han desarrollado varios algoritmos de localización, como se presenta en [3], el problema radica esencialmente en la imposibilidad por parte de las empresas de distribución, de implementar los algoritmos y esquemas existentes para la identificación y localización de fallas, en razón a sus implicaciones técnicas, económicas y de operación de los sistemas de distribución [2][3].

El desarrollo de la metodología propuesta para la localización de fallas monofásicas se encuentra justificado en la necesidad de las empresas del sector eléctrico colombiano, por mantener y mejorar sus niveles de calidad en la prestación del servicio de suministro de energía eléctrica.

Como contenido del artículo, en la segunda sección se realiza una descripción de la técnica de clasificación basada en inteligencia artificial y aprendizaje estadístico. En la tercera sección, se describe la metodología para la localización de fallas monofásicas, mientras que en la cuarta, se aplica la metodología a un circuito de distribución propuesto. Finalmente, se describen las conclusiones más importantes derivadas de esta investigación.

2. ALGORITMO DE APRENDIZAJE

La técnica de aprendizaje es un algoritmo de clasificación multivariable que combina la capacidad de generación de la lógica difusa y la capacidad de interpolación de las redes neuronales [4][5].

Las principales características de la técnica de aprendizaje utilizada son:

- Capacidad de aprendizaje supervisado y no supervisado.
- Evaluación de datos cuantitativos y cualitativos.
- Estructuras de aprendizaje secuencial.
- Implementación simple.

En esta técnica y para que se pueda identificar la clase a la cual pertenece un individuo, es necesario que individuo y clase sean caracterizados con un conjunto de descriptores. De la comparación de cada uno de estos descriptores, resulta un índice relacionado con el grado de similitud del descriptor del individuo con el descriptor de la clase. Estos índices son llamados Índices de Similitud Marginal (ISM) y se calculan para cada individuo, en cada descriptor de cada una de las clases predefinidas. Los resultados de estos índices se agrupan por medio de distribuciones y funciones de probabilidad en índices globales llamados Índices de Similitud Global (ISG). Estos cuantifican la similitud que tiene un determinado individuo con una clase dada. Existen varias formas de verificar la asignación de objetos, pero para el caso de la aplicación propuesta, esta clasificación se basa en la elección del índice ISG máximo.

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La estructura metodológica se muestra en la figura 1, donde se presenta un conjunto de pasos para estimar la ubicación e identificar el tipo de falla ocurrida en un sistema de distribución, a partir de las señales de tensión y corriente del sistema trifásico, adquiridas mediante los dispositivos de monitorización instalados en el circuito alimentador del sistema de distribución radial [6].

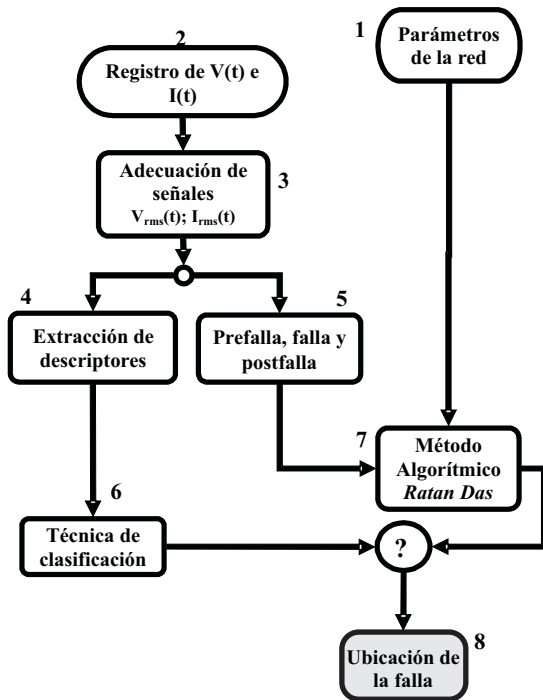


Fig.1. Esquema de la metodología y del proceso de clasificación

Los pasos propuestos se describen a continuación

3.1 Parámetros de la red-Bloque 1

En este paso se obtiene la información de la topología del sistema de distribución, tal como la distancia de los tramos entre estructuras, tramo aéreo o subterráneo, distribución espacial de los conductores y carga instalada por tramo, entre otros.

3.2 Señales de tensión y corriente-Bloque 2

Las señales de tensión y corriente de cada una de las fases ($v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$), se adquieren en este paso. Estas señales se utilizan para la localización de la falla, tal como se presentan en el siguiente paso.

3.3 Adecuación de señales-Bloque 3

Se obtiene el valor eficaz tanto de las señales de tensión como de corriente, mediante el empleo de una ventana deslizante de 128 muestras por ciclo, que se actualiza cada muestra [7].

3.4 Extracción de descriptores -Bloque 4

En este paso, se calculan los descriptores que caracterizan las señales procesadas por el bloque 3. En la Tabla I se describen los descriptores utilizados.

Tabla I. Descriptores utilizados para el proceso de clasificación.

Descriptor	Característica asociada
H_a, H_b, H_c	Profundidad de tensión por fase [p.u].
I_a, I_b, I_c	Elevación de corriente por fase [p.u].
PC_a, PC_b, PC_c	Pendiente de caída por fase.
$maxH$	Máxima profundidad de tensión monofásica [p.u].
$maxI$	Máxima elevación de corriente monofásica [p.u].
$minPC$	Mínima pendiente de caída monofásica.
$\bar{H}$	Media de las tres profundidades monofásicas [p.u].
$\bar{I}$	Media de las tres corrientes de monofásicas [p.u].
$\overline{PC}$	Media de las tres pendientes de caída monofásica.
σH	Desviación estándar de las tres profundidades monofásicas.
σI	Desviación estándar de las tres corrientes monofásicas.
σP	Desviación estándar de las tres pendientes de caída monofásicas.

3.5 Extracción de valores del fundamental de prefalla, falla y posfalla-Bloque 5

El método de localización de fallas algorítmico se fundamenta en el uso de las medidas del fundamental de tensión y corriente, las cuales deben ser calculadas tanto en prefalla como en falla y posfalla [9]

3.6 Técnica de clasificación-Bloque 6

Es uno de los pasos más importantes, en el cual se realiza la clasificación con la ayuda del algoritmo de aprendizaje para análisis de datos multivariable. Este bloque establece la zona en donde posiblemente se encuentra la falla.

3.7 Método algorítmico de localización- Bloque 7

En esta investigación como primera opción se ha seleccionado el algoritmo Ratan Das [8][9]. Este algoritmo se utiliza para la implementación en el modelo híbrido, porque considera las características propias de un sistema de distribución, es de fácil implementación, tiene alta precisión y su desarrollo es bastante bien presentado por el autor.

A partir de la implementación del método Ratan Das, en este bloque se obtienen el tipo y todas las posibles ubicaciones de una determinada falla en el sistema de distribución.

Todas las posibles ubicaciones de la falla son correlacionadas (bloque 8 en la Figura 1), con la zona o región de ubicación establecida por la técnica de clasificación en el bloque 6. La estrategia propuesta, permite reducir el número de posibles ubicaciones establecidas por el método Ratan Das.

La estrategia así propuesta es de gran valía, si se considera la gran cantidad de circuitos ramales que tienen los sistemas de distribución de energía eléctrica.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Como ejemplo de aplicación de la metodología propuesta, en esta sección se describe la aplicación al circuito de distribución mostrado en la Figura 2.

4.1 Obtención de los datos de entrenamiento y validación

La información de las fallas monofásicas se obtiene para propósito de pruebas, a partir de la simulación del sistema presentado en la Figura 2. De esta manera fue posible simular los 5 tipos de fallas presentes en sistemas de energía eléctrica.

Para esta aplicación se realizaron cinco fallas equidistantes en cada sección de línea y para impedancias de falla de $0,05 \Omega$, 5Ω , 10Ω , 25Ω y 50Ω . La base de fallas está compuesta por un total de 825 registros de tensión y de corriente de fallas.

El modelado y simulación extensiva de fallas se realizó utilizando un esquema cooperativo entre ATP y Matlab [3].

4.2 Análisis exploratorio de datos

El objetivo del análisis exploratorio de datos (EDA), es el de permitir la obtención de patrones y rasgos que más adelante faciliten la comprensión y el análisis de la información contenida en una base de datos. Información detallada de estas técnicas se puede obtener de referencias como [10][11].

En esta investigación se utiliza la técnica de la *Búsqueda de la Proyección* (PPEDA), apoyada posteriormente con el *Análisis de Componentes Principales* (PCA) [11].

Con el objetivo de encontrar patrones, se generaron observaciones para 36 distintos grupos de descriptores, y se obtuvieron para cada uno de ellos las proyecciones por medio de PPEDA, tal como se presenta en la tabla 2. El mismo proceso se realizó con todos los tipos de fallas.

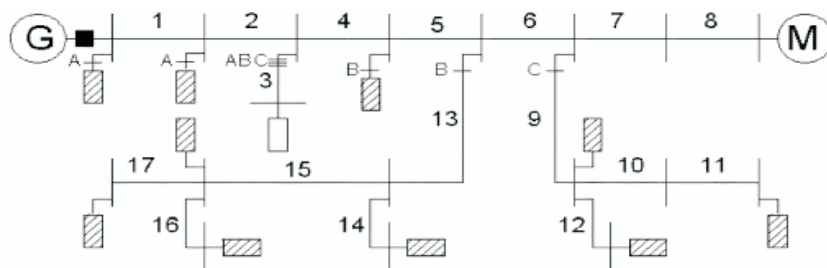


Fig.2 Diagrama unifilar del sistema de distribución seleccionado para pruebas.

Tabla 2. Grupos de descriptores para la búsqueda de la proyección a partir de los datos de fallas monofásicas.

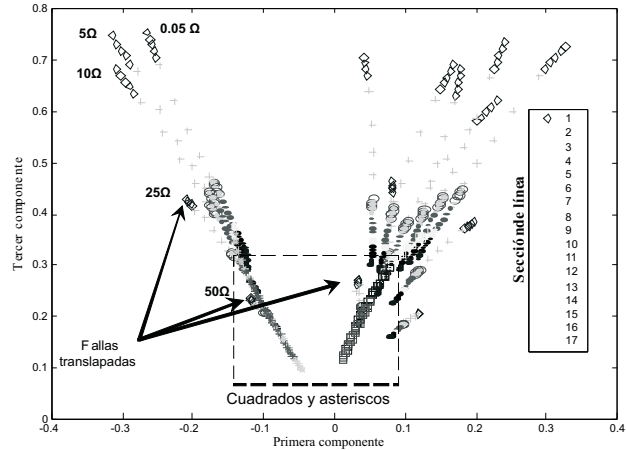
Grupo	Descriptor					
	1	2	3	4	5	6
1	<i>Ha</i>	<i>Hb</i>	<i>Hc</i>	<i>Ia</i>	<i>Ib</i>	<i>Ic</i>
5	<i>Ha</i>	<i>Hb</i>	<i>Hc</i>	<i>maxH</i>	-	-
6	<i>Ia</i>	<i>Ib</i>	<i>Ic</i>	<i>maxI</i>	-	-
10	<i>Ha</i>	<i>Hb</i>	<i>Hc</i>	<i>maxI</i>	-	-
11	<i>PCa</i>	<i>PCb</i>	<i>PCc</i>	<i>maxI</i>	-	-
12	<i>Ha</i>	<i>Hb</i>	<i>Hc</i>	<i>minPC</i>	-	-
13	<i>Ia</i>	<i>Ib</i>	<i>Ic</i>	<i>minPC</i>	-	-
19	<i>maxH</i>	σH	$\overline{H}$	-	-	-
20	<i>maxI</i>	σI	$\overline{I}$	-	-	-
26	<i>Ha</i>	<i>Hb</i>	<i>Hc</i>	<i>maxH</i>	σH	$\overline{H}$
36	<i>minPC</i>	<i>maxH</i>	-	-	-	-

Los grupos de descriptores 5, 10, 12, 19 y 26 dan las proyecciones con los mejores índices de proyección (ppi); el máximo índice se obtiene con el grupo 26. Como consecuencia de esto, se procedió a realizar el Análisis de Componentes Principales -PCA de las fallas monofásicas para el mismo grupo de descriptores No. 26.

En la Figura 3 se aprecia que las fallas con mayor componente vertical son las producidas en la primera sección del sistema de distribución (rombos azules), mientras que las que poseen menor componente vertical son la más distantes del alimentador, esto es, las producidas en la sección 8 y en las últimas secciones de los ramales monofásicos conectados a las fases B y C, respectivamente (cuadrados y asteriscos). Este comportamiento en el plano de la primera y tercera componente principal de los datos de fallas monofásicas del grupo No.26, ocurre también con los otros cuatro tipos de falla. Esto es importante porque la impedancia existente entre el punto de la falla y el alimentador, está relacionada proporcionalmente con la distancia, lo cual permite clasificar las fallas por zonas o grupos de secciones dentro del sistema de distribución.

En la Figura 3 se identifica que los valores de impedancias de falla mayores o iguales a 25Ω son relativamente altos, debido a que las fallas de 25Ω

y 50Ω producidas en la primera sección (rombos azules), se confunden o traslapan con las fallas producidas en las secciones más distantes del alimentador del sistema de energía (cuadrado y asteriscos). Todo lo contrario se visualiza en la Figura 4, donde todas las fallas producidas en la primera sección para impedancias de falla entre $0,05\Omega$ y 10Ω se encuentran concentradas en la parte superior.

Fig. 3 Primera y tercera componente de las fallas monofásicas (0.05Ω a 50Ω)

4.3 Entrenamiento del sistema inteligente

Las fallas utilizadas para el entrenamiento supervisado fueron las fallas simuladas al 5%, 50% y 95% de cada sección, mientras que las fallas de validación fueron las simuladas al 27,5% y 72,5%.

El número de clases de cada una de las cinco redes se determinó partiendo del supuesto que cada sección del sistema es una clase, y después, se agrupó en una nueva clase cada una de las secciones que tenían un comportamiento similar.

En la Figura 5 se muestran los resultados de validación de la red monofásica con la agrupación de secciones en zonas de falla. Realizando el mismo análisis para los demás tipos de falla, es posible seleccionar cada una de las secciones que conformarán cada zona de falla, como se muestra en la Figura 6.

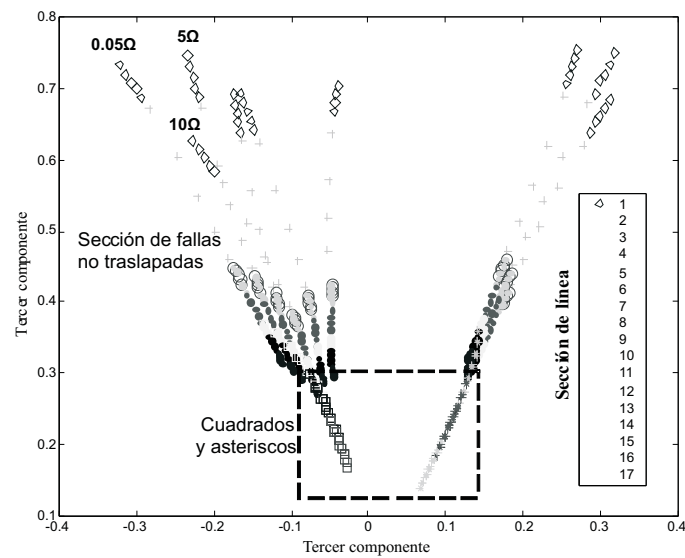


Fig. 4. Primera y tercera componente de las fallas monofásicas (0.05Ω a 10Ω).

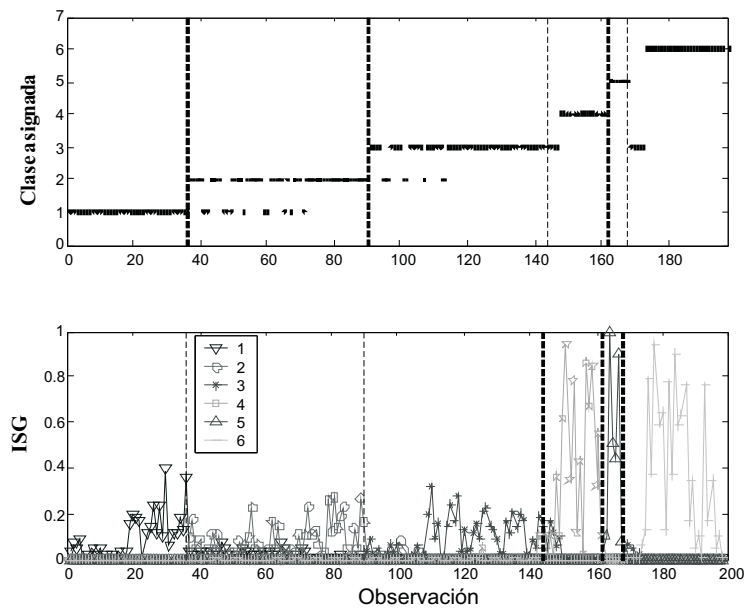


Fig. 5. ISG y zona de falla asignada durante la validación de la red monofásica.

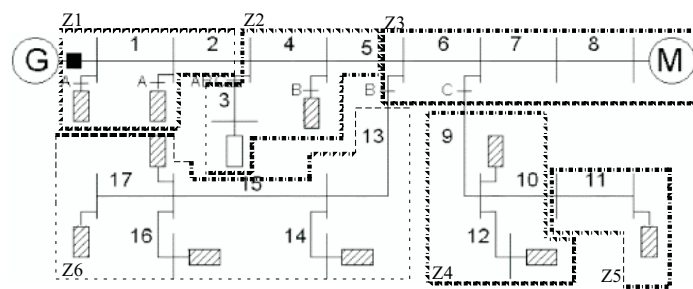


Fig. 6. Zonas de falla monofásicas

4.4 Validación del sistema inteligente

En la parte inferior de la Figura 5 se describe el comportamiento del ISG de cada una de las zonas de falla monofásica, manifestándose un comportamiento Gaussiano con medias y desviaciones distintas con respecto a las otras zonas de falla. Este comportamiento del ISG es significativo, porque permite confirmar que el clasificador es capaz de discriminar entre cada una de las posibles zonas de falla monofásica, tal como se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Número de aciertos en la validación de cada una de las cinco redes basadas en la técnica Lamda

Zona	Aciertos para el caso de las fallas monofásicas
1	36/36
2	41/54
3	40/54
4	12/18
5	6/6
6	19/30
Total	154/198 (77,7%)

Tal como muestra el ejemplo, el sistema tiene un alto desempeño para las características del circuito de prueba. Cuando el sistema cambia de topología, el algoritmo de aprendizaje debe ser entrenado para la nueva situación. En resumen, el algoritmo de localización de fallas monofásicas debe tener varios módulos de aprendizaje para cada una de las configuraciones posibles del sistema de potencia. Como parte importante del trabajo futuro, se debe considerar el caso de los otros tipos de fallas y el caso de los sistemas mallados.

5. CONCLUSIONES

La metodología presentada tiene un alto índice de acierto en la localización de la zona bajo falla monofásica (77,7%). Para su correcta implementación se debe disponer de una base de fallas considerable, donde se encuentren fallas de la mayor parte de los circuitos. Como esto no siempre es posible, se debe recurrir a estrategias de simulación y ajuste de los circuitos.

Mediante la aplicación de la metodología propuesta es posible mejorar los índices de calidad referentes a la duración y al número de las interrupciones. El índice de duración de las interrupciones se puede reducir, debido que la metodología incide directamente en el tiempo de acceso (tiempo para acceder a la red con el objeto de comenzar la búsqueda de la falla) y el tiempo de recorrido (tiempo que se tarda en recorrer la parte afectada de la red para determinar el punto exacto donde se ha producido la falla) al momento de aislar una falla permanente presente en el sistema de distribución.

Adicionalmente, la implementación de la metodología implicaría en la reducción del índice referente al número de interrupciones, porque permitirá detectar la ubicación de posibles causas de fluctuaciones de tensión que posiblemente producirían una interrupción en el suministro de la energía eléctrica.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. A. Short. *Electric Power Distribution Handbook*, CRC press, 2003.
- [2] IEEE Std C37.114, *IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*, Power System Relaying Committee, 2004.
- [3] J. Mora, *Localización de Fallas en Sistemas de Distribución*, Tesis Doctoral, Universidad de Girona, España, 2006.
- [4] J. Aguilar, N. Lopez. *The process of classification and learning the meaning of linguistic descriptors of concepts*, Approximate Reasoning in Decision Analysis, 1982, pp. 165-175, N. Holland.
- [5] J. Waissman, J. Aguilar, M. Dahhou. *Construction d'un Modele Comportemental pour la Supervision de Procèdes: Application a une Station de Traitement des Eaux*, Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2000.

[6] V. Barrera, J. Cormane, G. Ordóñez, *Metodología para el mejoramiento de los índices de continuidad del suministro de energía eléctrica*, III Simposio Internacional Calidad de la Energía Eléctrica (SICEL), Colombia, 2005.

[7] M.H.J Bollen. *Understanding Power Quality Problems: Voltages Sags and Interruptions*, IEEE PRESS, 2000

[8] J. Mora-Florez, J. Melendez and G. Carrillo-Caicedo, *Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems*, Electric Power Systems Research, vol. 28, no. 4, pp. 657–666, 2008.

[9] R. Das, *Determining the Locations of Faults in Distribution Systems*, Doctoral Thesis, University of Saskatchewan Saskatoon, Canada, Spring, 1998.

[10] W. Martínez, A. Martínez, *Computacional Statistics Handbook with MatLab*, Chapman & Hall/CRC, Boca Ratón, Florida, 2002.

[11] D. Peña, *Análisis de datos multivariantes*, Universidad Carlos III de Madrid, Mac Graw Hill, Madrid, 2002, pp. 133170, Cap. 5.