

Localización de fallas en un aerogenerador vía redundancia analítica

Patricia Acosta Santana, Efraín Alcorta García,
Luis H. Rodríguez Alfaro
Posgrado de la FIME-UANL
ealcortag@gmail.com



RESUMEN

La localización de fallas basada en modelos es considerada en un aerogenerador utilizado como banco de pruebas. La localización de fallas en los generadores eólicos es una tarea muy importante para mejorar la calidad de la energía (incluyendo estrategias de reconfiguración del sistema) así como para permitir el mantenimiento adecuado. En este trabajo se considera el uso de técnicas de diagnóstico basadas en observadores para la localización de fallas en el generador eólico. La propuesta es probada con una simulación realista proporcionada por un fabricante de generadores eólicos.

PALABRAS CLAVE

Aerogeneradores, fallas, identificación, observadores, redundancia analítica.

ABSTRACT

Model-based troubleshooting is considered in a wind turbine used as testbed. Troubleshooting in wind generators is a very important task to improve the quality of energy (including system reconfiguration strategies) as well as to allow proper maintenance. In this work, it is considered the use of diagnostic techniques based on observers for troubleshooting in the wind generator. The proposal is tested with a realistic simulation provided by a manufacturer of wind generators.

KEYWORDS

Wind turbines, failures, identification, observers, analytical redundancy.

INTRODUCCIÓN

Los temas de calidad de energía así como la generación de energía limpia ocupan mucha atención de la comunidad científica en los años recientes. Una manera de obtener energía limpia es convirtiendo en electricidad la energía mecánica que produce el viento al mover las aspas conectadas a un generador eléctrico. Los años recientes registran un aumento de la producción de energía eléctrica obtenida de la fuerza del viento, ver por ejemplo la referencia¹. Paralelo al incremento del uso, la complejidad e importancia de la continuidad en la operación también crece. Esto hace reconocer en las técnicas de diagnóstico de fallas basadas en el modelo una herramienta importante.

Existen algunos trabajos ya reportados en la literatura que abordan el tema,^{2,3} los que revisan los métodos clásicos de análisis frecuencia-tiempo, vibración, tendencias, etc. En las referencias^{4,5,6} se utilizan métodos basados en el modelo, en particular métodos basados en observadores. En las referencias^{5,6} se reporta la localización de fallas en los sensores del sistema de desviación de paletas. P. F. Odgaard *et al*⁴ reportan el diagnóstico de fallas en sensores del tren de mando y convertidor. En W. Chen *et al*⁷ reportan un resultado más completo, pues utilizando también observadores se consideran todas las fallas anteriores simultáneamente.

En este trabajo se considera un esquema de diagnóstico de fallas basado en observadores que pretende ser sencillo y eficiente. El esquema es probado mediante simulación de un modelo no lineal completo sujeto a ruido. Los resultados muestran que el método utilizado permite la localización de casi todas las fallas obteniendo un compromiso entre complejidad y eficiencia. Resultados preliminares de este trabajo fueron presentados y discutidos en la referencia¹³.

PRELIMINARES

Diagnóstico de fallas

Dentro de la comunidad de control es reconocido que la tarea de diagnóstico de fallas basado en modelos puede ser realizada en dos pasos:^{8,9,10}

1. Generación de residuos. Se diseñan filtros para obtener señales que dependen únicamente de las fallas, eliminando el efecto de las entradas conocidas. Idealmente estas señales son cero si no hay fallas y diferentes de cero si hay fallas. Una forma de realizar un generador de residuos es mediante un observador de la salida, el cual es definido con el modelo matemático del sistema más un término de corrección formado como el producto de una ganancia por el error de estimación de la salida. Ver figura 1. El tipo de observador de la salida requerido se utiliza para obtener un estimado del valor nominal de la salida del sistema. El observador utilizado es muy parecido al bien conocido observador de Luenberger.^{9,11} La diferencia radica en que el observador de Luenberger fue propuesto con la finalidad de estimar variables internas de

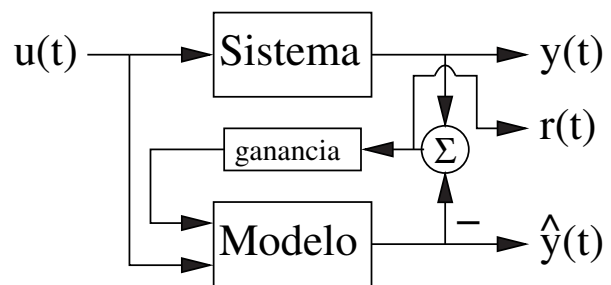


Fig. 1. Generador de residuos basado en observador.

un sistema, mientras que en la generación de residuos la idea es obtener un estimado de la salida nominal (sin el efecto de las fallas), para poder así definir los residuos.

2. Evaluación de residuos. Es el proceso utilizado para extraer la información de las fallas. En este trabajo se utilizan ventanas de tiempo ponderadas para hacer la evaluación.

Con la finalidad de obtener mayor robustez con respecto a incertidumbre se realiza un procedimiento de desacoplo. Este es utilizado en el aerogenerador para poder localizar las fallas. Ver por ejemplo las referencias^{9,10,11}.

MODELO DEL AEROGENERADOR

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento. Existen diferentes tipos de aerogeneradores los cuales se distinguen por su potencia, disposición de su eje de rotación y tipo de generador.



El modelo del aerogenerador usado en este desarrollo está basado en una turbina de viento de velocidad variable de tres paletas con convertidor pleno. La turbina genérica desarrolla una potencia de 4.8 MW¹² y se compone de los siguientes subsistemas: Sistema de desviación de paletas, tren de mando y generador-convertidor. Ver figura 2.

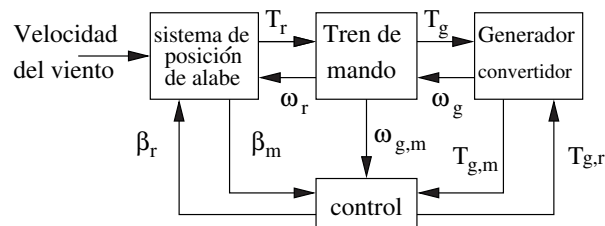


Fig. 2. Representación esquemática del aerogenerador.

A. Sistema de desviación de paletas.

Este sistema ajusta la paleta para corregir la posición en relación a la velocidad del viento, potencia y estrategia de control. Además trabaja como sistema de freno primario cuando es necesario. Este actuador puede ser eléctrico o hidráulico. El sistema hidráulico de desviación es modelado como un sistema de segundo orden. Cada sistema de desviación tiene una representación mediante un modelo de segundo orden al que se le agregan las diferentes señales que representarán las fallas.

B. Sistema Tren de Mando.

Este sistema del aerogenerador tiene como propósito principal transformar la potencia de rotor, alto torque y baja velocidad a una alta velocidad y un bajo torque requerido por el generador para la producción de potencia eléctrica. Se considera un modelo de tercer orden con dos entradas de control.

C. Sistema generador-convertidor.

El generador transforma la energía rotacional en potencia eléctrica la cual puede ser alimentada a la red vía el convertidor. La dinámica del convertidor puede ser modelada por un sistema de primer orden.

En total el modelo completo consiste de 10 ecuaciones diferenciales lineales con algunos elementos de interconexión no-lineales. Los detalles del modelo pueden ser consultados en las referencias^{4,7} o en la¹³.

ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS

A. Representación de fallas

Se consideran 10 fallas diferentes del aerogenerador, las cuales comprenden fallas en sensores (F1, F2, F3, F5A, F5B, F4), en actuadores (F6, F7, F8) así como en el sistema (F9) (ver tabla I). Cabe hacer notar que las fallas definidas proceden de una empresa del ramo que definió las fallas de acuerdo con historiales de mantenimiento. Adicionalmente se consideran tanto fallas aditivas como multiplicativas. Es importante destacar que el generador eólico opera en lazo cerrado de control.

Para la primera aspa del sistema de desviación se agrega la representación de la falla F1 que representa un error en el sensor de manera que envía un valor constante de la posición de la paleta 1.

Tabla I. Fallas consideradas.

Res	Falla	Descripción	Intervalo
r ₁	F1	Sesgo en el ángulo del álabo 1 de 5 grados.	2000 2100
r ₂	F2	Incremento del 20% en ángulo del álabo 2.	2300 2400
	F6	Sesgo en sensor de la velocidad angular 2, con un valor de 5.73 rad/seg.	2900 3000
r ₃	F3	Sesgo en el ángulo del álabo 3 con un valor de 10 grados.	2600 2700
	F7	Baja presión del actuador en un 20%.	3400 3600
r _{4A}	F5A	10 % error de escalamiento en velocidad del eje.	1000 1100
	F9	8% de cambio en la dinámica del generador.	4000 4400
r _{4B}	F5B	10% de error de escalamiento en velocidad angular del eje.	1000 1100
	F9	Reducción de 5% en la dinámica del generador.	4000 4400
r _{4C}	F4	Sesgo en sensor de velocidad angular del eje con un valor de 1.4 rad/seg.	1500 1600
	F9	Reducción del 5% en la dinámica del generador.	4000 4400
r ₅	F8	Sesgo en el actuador.	3800 3900

B. Diagnóstico de fallas

Con el objetivo de generar los residuos para la localización de las fallas, primero se requiere hacer desacoplo en cada subsistema (donde sea requerido) con la finalidad de separar el efecto de las fallas y/o perturbaciones. La generación de residuos se realiza para cada subsistema mediante un observador. El error de estimación de la salida es utilizado como residuo. La ganancia del observador se calcula por el método de ubicación de polos.

Para el subsistema de desviación de paletas se eligió una ubicación de polos del observador con valor muy cercano a los polos del sistema, pues el sistema está mal condicionado numéricamente.

Para el subsistema de tren de mando se utilizó desacoplo para separar el efecto de las fallas. La ubicación de polos del generador de residuos se hizo sin problemas.

Para el subsistema de generador-convertidor se utiliza un observador en forma directa, pues en el modelo de primer orden no hay forma de practicar algún desacoplo. La relación entre los generadores de residuos r_i y las fallas F1 a F9 se puede observar en la tabla I.

Los residuos r_1 y r_5 están asociados a una sola falla cada uno. Se observa un acoplamiento entre la falla F2 y la F6, pues solo hay un residuo que se activa para estas dos fallas. Igualmente F3 y F7 están acopladas mediante el residuo r_3 . La falla F9 aparece en todos los generadores de residuos r_4 .

Esta relación del efecto de las fallas y los residuos es consecuencia del procedimiento de desacoplo y de la conexión física de las fallas.

En todos los casos se utilizó un filtro que promedia los valores ponderados de una ventana de tiempo. El tamaño de la ventana cambia las características del diagnóstico: si la ventana de tiempo es muy pequeña se aumenta la sensibilidad a las fallas, pero también al ruido de medición. Ventanas de tiempo mas grandes ayudan a que el efecto del ruido de medición se reduzca, pero también aumenta el tiempo requerido para diagnosticar fallas. El esquema general utilizado se muestra en la figura 3.

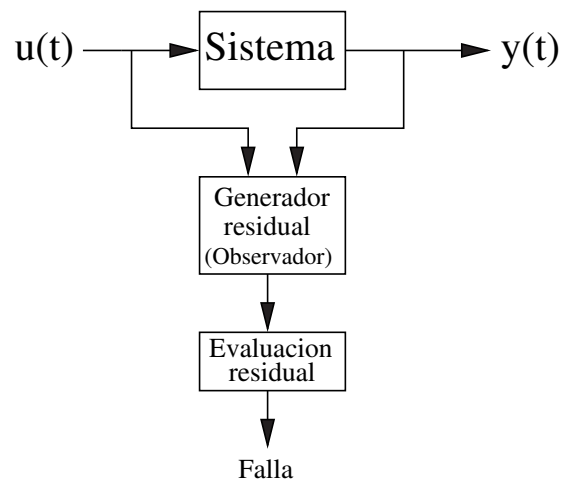


Fig. 3. Esquema de diagnóstico utilizado.

RESULTADOS DE LA APLICACIÓN AL GENERADOR EÓLICO

Los resultados son presentados de manera gráfica. Enseguida se muestran los resultados del residuo evaluado en función del tiempo para los diferentes escenarios de falla.

En la figura 4 se muestra la evolución en el tiempo del residuo 1 en la presencia de falla F1.

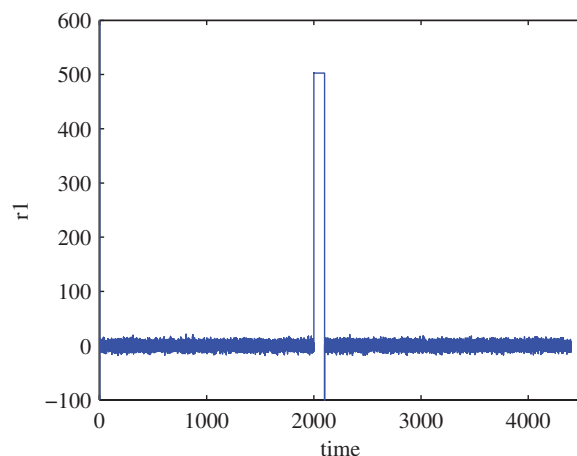


Fig. 4. Residuo 1 bajo el efecto de la falla F1.

La manifestación de la falla considerada en el residuo no deja lugar a dudas que se pueda localizar satisfactoriamente.

En la figura 5 se presenta el residuo 2 bajo el efecto de las fallas F2 y F6.

Como se puede apreciar en la figura 5, las fallas F2 y F5 se manifiestan claramente sobre el residuo

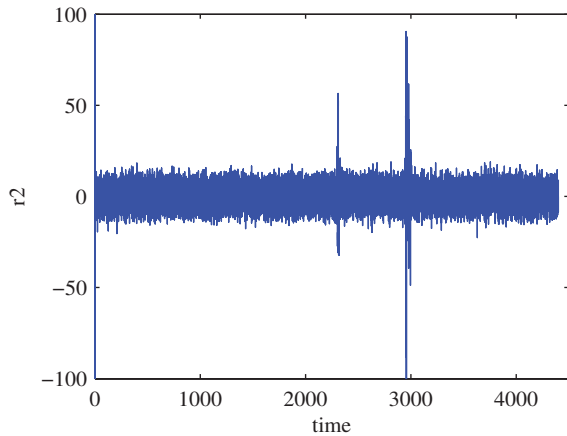


Fig. 5. Evolución temporal del generador de residuos 2 en la presencia de fallas.

2 y pueden ser localizadas. No es posible distinguir entre estas fallas. Se puede apreciar también que el nivel del residuo no es tan marcado como en el caso del residuo 1.

En la figura 6 se presenta la evaluación del residuo 3, el cual está sujeto al efecto de dos fallas, F3 y F7.

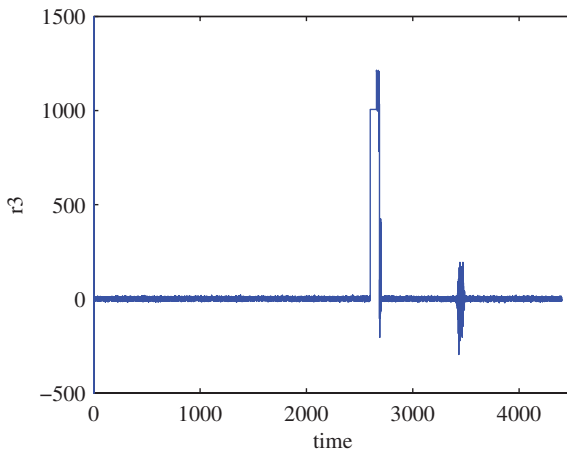


Fig. 6. Evolución del residuo 3 en la presencia de fallas F3 y F7.

Claramente se aprecia que las fallas pueden ser detectadas sin problema.

En la figura 7 se presentan los resultados del residuo 4^a, el cual está siendo afectado por las fallas F5A así como F9.

Es claro como la falla F5A puede ser detectada sin problema. La falla F9 también puede ser detectada, sin embargo, debido a los niveles del ruido

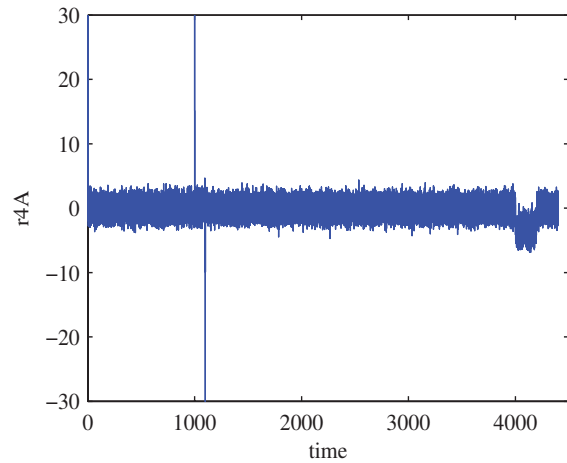


Fig. 7. Evolución del residuo 4A.

se empieza a complicar. En la figura 8 se presenta la evolución del residuo B, sensible a fallas F5B así como F9.

De la figura 8 resulta evidente que el diagnóstico de F9 a partir del residuo no es posible (al menos a simple vista). Alternativamente se aumentó el tamaño de la ventana a 500 muestras, los resultados se muestran en la figura 9.

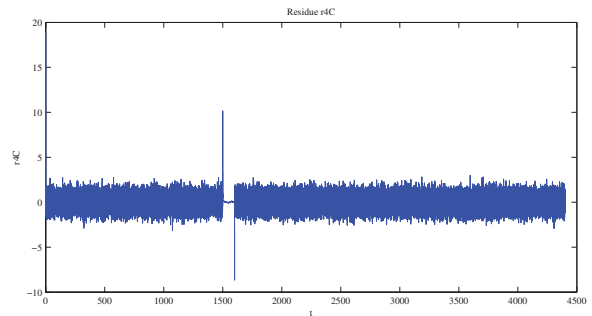


Fig. 8. Evolución del residuo 4B.

Se puede ver como aumentando el tamaño de la ventana de tiempo es posible el diagnóstico de F9. Es claro que al hacer esto, la sensibilidad a F5B se pierde. La localización en este caso es posible, sin embargo se requiere mayor procesamiento y la falla F9 solo se obtiene después de un retraso considerable.

En la figura 10 se muestra al residuo 4C, sensible en principio a F4 y F9.

Nuevamente se presenta el problema de sensibilidad a F9, el cual puede ser tratado como antes.

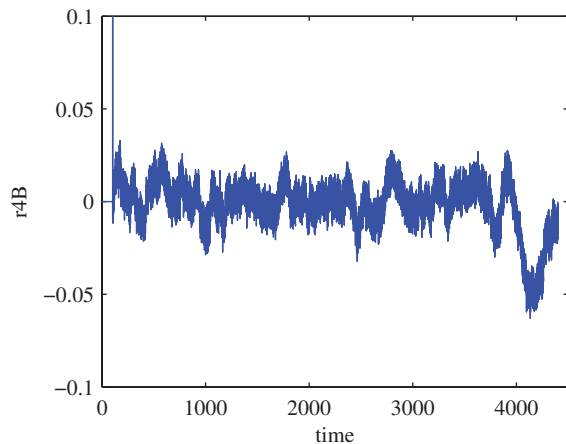


Fig. 9. Residuo 4B (100,000 puntos).

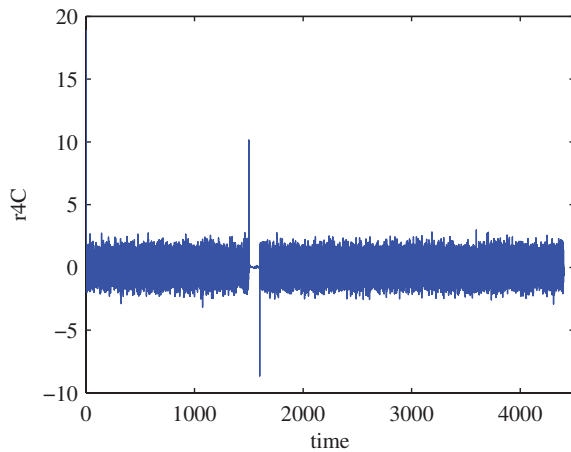


Fig. 10. Residuo 4C.

En la figura 11 se presenta la evolución temporal del residuo 5, el cual es sensible a la falla F8.

El diagnóstico y localización de la falla F8 puede ser realizada satisfactoriamente.

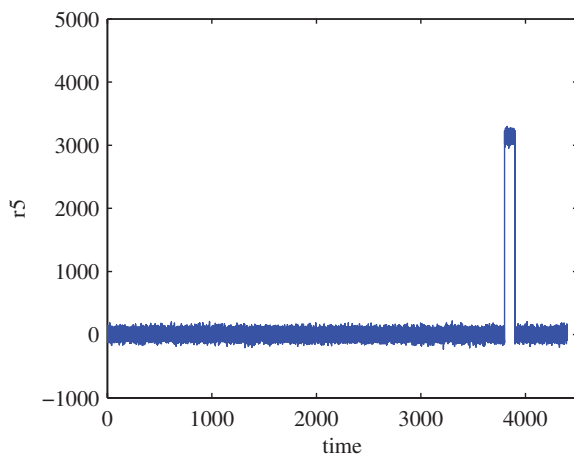


Figura 11. Residuo 5.



CONCLUSIONES

Para el modelo del aerogenerador, es posible evidenciar el momento en que se generan las fallas de una forma relativamente sencilla, el uso de un observador y un filtro extienden esta posibilidad hasta lograr mostrar 9 de 10 fallas aplicadas al sistema. La única falla que no se logró distinguir, fue ocultada por el ruido de sensores. La combinación de métodos basados en observadores y la evaluación utilizando una ventana de tiempo ponderada resultó ser muy efectiva en la localización de fallas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento por parte de CONACYT mediante el proyecto 178282 y de la UANL a través del proyecto PAICYT.

BIBLIOGRAFÍA

1. Proyecto Tech4CDM La energía Eólica en México. Ver Pagina WEB: http://www.tech4cdm.com/uploads/documentos/documentos_La_Energia_Eolica_en_Mexico_fefd89d8.pdf
2. Z. Hameed, Y. Hong, Y Cho, S. Ahn and C. Song, Condition monitoring and fault detection in wind turbines and related algorithms: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:139, 2009.
3. B. Lu, Y. Li, X. Wu and Z. Yang, A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, In proceedings of the Power Electronics and Machines in Wind Applications, 1999.

4. P. F. Odgaard, J. Stroustrup, and M. Kinnaert. Fault tolerant control of wind turbines - a benchmark model. In Preprints of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, 2009.
5. X. Wei, M. Verhaegen, and T. van den Engelen. Sensor fault diagnosis of wind turbines for fault tolerant. In the 17th World Congress the Inter. Fed. of Automatic Control, Seoul, SouthKorea, 2008.
6. X. Wei, M. Verhaegen, and T. van den Engelen. Sensor fault detection and isolation for wind turbines based on subspace identification and Kalman filter techniques. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 24(8):687–707, 2009.
7. W. Chen, S. X. Ding, A. Haghani, A. Naik, A. Q. Khan, and S. Yin. Observer-based fdi schemes for wind turbine benchmark. In the 18th IFAC World Congress, pages 7073–7078, Milano, Italy, 2011. IFAC.
8. P. M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey. Automatica, 26:459–474, 1990.
9. S. X. Ding. Model-based fault diagnosis techniques. Springer, 2008.
10. R. Isermann. Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance. Springer, 1 edition, November 2006.
11. J. Chen and R. J. Patton. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems. Kluwer, 1999.
12. P. Odgaard and J. Stroustrup, Fault Tolerant Control of Wind Turbines-a benchmark model, 3rd ed. Harlow, England: Addison-Wesley, 1999.
13. P. Acosta Santana, E. Alcorta García, L. H. Rodríguez Alfaro, Model-based fault isolation in an Aerogenerador benchmark, 2012 World Automation Congress, June 24th - 27th, 2012 , Puerto Vallarta, México.

A Navigation through Science and Technology
4th INTERNATIONAL SUPERCOMPUTING CONFERENCE IN MEXICO
5-8 March 2013 / Manzanillo, Colima, México / Hotel Karmina, Barceló



Universidad de Colima, Av. Universidad #333. Colonia Las Víboras.
C.P. 28040. Colima, Col., México.

Tel (+52)312 31 61 000

<http://www.isum.mx/>

