

CUADERNOS DE INGENIERÍA

Nueva serie

Publicaciones Académicas

10 | 2018



EDICIONES
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA
SALTA - ARGENTINA

Cuadernos de Ingeniería es la revista científica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Católica de Salta, Argentina, creada en el año 2006 y publicada bajo el sello EUCASA (Ediciones Universidad Católica de Salta).

Es una publicación de periodicidad anual, que contiene artículos científicos y de revisión y reseñas de libros sobre tópicos directamente relacionados con el campo disciplinar de la ingeniería en todas sus ramas, como así también temas tales como la enseñanza de la ingeniería, el desempeño de la profesión, la ética y los valores en la ingeniería, las interrelaciones entre la ingeniería y la política, la cultura, la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Todos los trabajos recibidos son objeto de revisión por parte de evaluadores externos.

Cuadernos de Ingeniería is the scientific magazine published by Universidad Católica de Salta, Argentina. It was created in 2006 and is an imprint of EUCASA (Ediciones Universidad Católica de Salta - Universidad Católica de Salta Editions).

It is an annual publication which contains papers, and book reviews about topics directly related with the wide field of engineering science, including relationship between engineering and politics, ethic, culture and economy sciences, as well as engineering education and professional matters.

All papers received are submitted to external reviewers.

SUMARIO

Editorial.....	5
Lía Orosco Segura	
Relevamiento de las tecnologías en desarrollo de MIMO, BeamForming, balanceo de carga y reutilización del espectro en la implementación de radios cognitivas / <i>Survey of the technologies in development of MIMO, BeamForming, Load Balancing and reuse of the spectrum in the implementation of cognitive radios</i>	7
Roberto Daniel Breslin, Pablo Narváz y Emiliano Horvath	
Propuesta para propiciar capacidades éticas en los Ingenieros en Informática/Sistemas de Información a través de la formación por competencias / <i>Propiciating ethical capacities in Computing/Informatic Engineers by competency-based education: a proposal</i>	15
Beatriz Parra de Gallo	
Estimación de la función logística de Pearl Verhulst / <i>Estimation of the Pearl-Verhulst Logistic function</i>	29
Mika Haarala	
Una breve revisión del Modelado y Simulación basados en agentes/ <i>A review on agent-based modeling and simulation</i>	47
Gustavo Rivadera	
Aislamiento sísmico. Una estrategia eficiente para el cambio de paradigma en la ingeniería estructural sismorresistente / <i>Seismic isolation. An efficient strategy for change of paradigm in earthquake resistant structural engineering</i>	57
Miguel Eduardo Tornello y Gustavo Gioacchini	
Sistema de iluminación inteligente: propuesta para su implementación en zonas frías / <i>Intelligent lighting system: proposal for its implementation in cold areas</i>	109
Guillermo Villalba, Carlos Cadena	

Editorial

El Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (IESIING), de la Facultad de Ingeniería de la UCASAL, presenta con gran satisfacción el número 10 de sus Cuadernos de Ingeniería, el que pudo concretarse con aportes de docentes de nuestra Facultad como así también de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) —Facultad Regional Mendoza— y de la Universidad Nacional de Salta. Cumplimos el anhelo de que profesores de otras instituciones, den a conocer los resultados de sus investigaciones a través de esta publicación.

El artículo de la MBA Ing. Parra, además de realizar una reflexión y análisis de los principales conceptos de la educación por competencias en el área de la ingeniería en general y de la Ingeniería en Informática/Sistemas de Información en particular, realiza una propuesta para propiciar la formación ética de los alumnos de tales carreras, en el marco de este paradigma. Dada la actualidad del tema en el área de la enseñanza de la ingeniería, esperamos que este sea un aporte a su comprensión.

El desarrollo a grandes velocidades en las telecomunicaciones, con el advenimiento de la quinta generación de telefonía celular 5G, pone en el tapete una serie de conocimientos en desarrollo que son necesarios para alcanzar esta tecnología. El artículo de los Ingenieros Breslin, Narváez y Horvath realiza una reseña de estos avances, señalando el camino que deben recorrer los esfuerzos en I+D para el logro de este crecimiento tecnológico.

Por otro lado, en el campo de la Ingeniería en Informática, el Msc. Ing. Rivadera presenta conceptos de modelación basada en agentes, mediante una exhaustiva búsqueda bibliográfica, poniendo énfasis en el amplio campo de su aplicación.

También en el campo de la Ingeniería en Informática, el trabajo de los Ingenieros Villalba y Cadena muestra el algoritmo que controla un sistema de iluminación inteligente y autónomo, desarrollado para su funcionamiento en zonas muy frías, como la región de la Puna salteña. El sistema es apto para zonas de difícil acceso, que carecen del servicio de luz eléctrica.

Los profesores Dr. Ing. Tornello y Dr. Ing. Gioacchini realizan una completa revisión de sistemas de aislamiento de bases de edificios, estrategia para dotar de sismorresistencia a aquellos ubicados en zonas sísmicas, cada vez más utilizada. Reportan los resultados obtenidos de su aplicación a las estructuras de los dormitorios para estudiantes, construidos en la UTN, Facultad Regional Mendoza.

Finalmente, el MSc Haarala propone un método innovativo para estimar la función logística de Pearl-Verhulst, aplicándola a dos problemas relacionados pero de comportamiento distinto: la estimación de la tasa de crecimiento de la población en la ciudad de Salta y la disminución de

la tasa de nacimientos en Finlandia.

Por otro lado, con este número, además de la revisión por parte del Comité Editorial, los artículos aprobados fueron evaluados por pares externos, inaugurando así este necesario proceso para asegurar la calidad de los artículos publicados. Se agradece a los especialistas convocados su buena disposición y el inmejorable trabajo realizado, valioso también para el desarrollo de nuestros estudios.

Dra. Ing. Lía Orosco Segura
Directora del IESIING
Universidad Católica de Salta

Relevamiento de las tecnologías en desarrollo de MIMO, BeamForming, balanceo de carga y reutilización del espectro en la implementación de radios cognitivas

Survey of the technologies in development of MIMO, BeamForming, Load Balancing and reuse of the spectrum in the implementation of cognitive radios

Roberto Daniel Breslin¹; Pablo Narváez¹; Emiliano Horvath¹

Resumen

La necesidad de tener eficiencia de utilización del espectro radioeléctrico, conseguir mayores coberturas y una asignación de recursos, distribuida, cooperativa y colaborativa, da origen a la radio cognitiva, que junto a la tecnología de Múltiples entradas y Múltiples salidas (MIMO) serán la base para el futuro en comunicaciones móviles. Este trabajo propone relevar las líneas de investigación que brindan soluciones a algunas problemáticas subyacentes en estos esquemas planteados sobre tres ejes: formación de haz colaborativo, asignación de recursos centralizada y balanceo de carga con asignación de ancho de banda distribuido.

La solución de cada problemática en forma individual y asignada a una solución tecnológica global, podría constituir la base para un esquema de altas velocidades de transferencia de datos y máxima cobertura.

Palabras clave: radio cognitiva - balanceo de carga - formación de haz colaborativo - análisis de espectro

Citar: Breslin, R. D.; Narváez, P.; Horvath, E. (2018). Relevamiento de las tecnologías en desarrollo de MIMO, BeamForming, balanceo de carga y reutilización de espectro en la implementación de radios cognitivas. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva Serie*. [Salta - Argentina], núm. 10: 7-14.

¹ Facultad de Ingeniería -UCASAL, IESIING Salta - Capital, Salta, Argentina.

Abstract

The need to have efficiency in the use of the radioelectric spectrum, to achieve greater coverage and an allocation of resources, distributed, cooperative and collaborative, gives rise to cognitive radio, which together with the technology of multiple entries and multiple outputs (MIMO) will be the basis for the future in mobile communications. This work proposes to highlight the lines of research that provide solutions to some underlying problems in these schemes on three axes: collaborative beam formation, centralized resource allocation and load balancing with distributed bandwidth allocation.

The solution of each problem individually and assigned to a global technological solution, could form the basis for a scheme of high data transfer speeds and maximum coverage.

Keywords: cognitive radio - load balancing - collaborative beamforming - spectrum analysis

Introducción

La sociedad requiere, cada vez más, de los servicios brindados por las telecomunicaciones. El crecimiento de los servicios que pueden ser ofrecidos por los sistemas de comunicación móviles se incrementa acompañado por el desarrollo tecnológico y las demandas de las aplicaciones basadas en servicios.

El mercado de las telecomunicaciones se orienta principalmente a los sistemas de multiplataforma, en donde los dispositivos móviles ocupan un rol preponderante, a su vez, todos los servicios tienden a requerir un mayor volumen en la transmisión de datos, por lo que el incremento de la velocidad y la capacidad de transmisión es la necesidad primordial.

El constante aumento del ancho de banda por los sistemas inalámbricos propició el desarrollo de investigaciones tendientes a la quinta generación de telefonía celular 5G que está prevista para el año 2020 (Jaber et al., 2016; Feng et al., 2016, Zaidi, 2016).

A fin de lograr el objetivo de incrementar mil veces las actuales capacidades, es que se producen desarrollos que tienden a cubrir todos los vacíos posibles de las anteriores tecnologías, tanto en el campo del aprovechamiento del ancho de banda como en el de mejorar los sistemas de transmisión y de expansión de la cobertura.

Sin embargo, las expectativas tienen una limitación, dado el alto grado de saturación que presenta el espectro de frecuencias, especialmente hasta los 10 GH. Es por ello que actualmente se analiza, tanto a nivel nacional como internacional, la forma de reutilizarlo de una mejor manera, para lo cual se han ido desarrollando nuevas tecnologías más acordes al estado actual del arte, como es el caso de los equipos ya existentes en el mercado que cumplen con la Recomendación 802.22, de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), los cuales están enfocados al empleo de técnicas de radios cognitivas en el uso compartido del espectro radioeléctrico no utilizado asignado al servicio de difusión de televisión.

Las redes de radios cognitivas

Sin duda las tecnologías emergentes que mejor definen el entorno en el que se basará la quinta generación de telefonía celular son lo que se denomina radio cognitiva.

La definición de redes de radios cognitivas hace referencia a la posibilidad de implementar redes de dispositivos de comunicación inalámbricos (que no excluyen a los alámbricos) que puedan operar tanto como un receptor/transmisor de datos, como así también, como un repetidor inteligente de datos en una red inteligente, que se adapte dinámicamente a las necesidades instantáneas de la totalidad de los usuarios haciendo uso de las capacidades de retransmisión y de aprovechamiento del ancho de banda.

Una red de radio cognitiva es una técnica para radios, controlada por un software que se desarrolla para incrementar la utilización del espectro de frecuencias de radio que, como se mencionó, tiene un alto grado de congestión.

El concepto se basa en que la mayoría del espectro radioeléctrico permanece asignado pero inactivo por largos periodos de tiempo y, si es aprovechado, su uso se hace más eficiente.

Se establece un sistema de usuarios secundarios y primarios. Se denominan primarios a aquellos que poseen una conexión a una frecuencia licenciada (por ejemplo de telefonía celular). El sistema verifica permanentemente los entornos de radio, y, por sí mismo, encuentra espacios de frecuencia libres para poder ajustar el transmisor y aprovechar esos recursos inactivos a lo largo de sistemas primariamente licenciados. De esta manera cuando los usuarios primarios que tienen asignadas frecuencias licenciadas, no las utilizan por momentos, los usuarios secundarios que también pertenecen a la red pueden usar esas frecuencias a modo de préstamo, hasta tanto el usuario primario las requiera. La clave para hacer viable las redes cognitivas libres de interferencias está en cómo detectar esos «espacios blancos» del espectro de banda ancha y el mayor desafío consiste en generar un mecanismo de coordinación que evite la colisión de usuarios pertenecientes a diferentes redes de radios cognitivas por los mismos espacios en el espectro (Jaswal, 2016).

Tecnologías necesarias

Cuatro tecnologías fundamentales son necesarias para una verdadera red de radio cognitiva:

- Espectro compartido.
- Balanceo de carga dinámico.
- Formación de haz colaborativo-dinámico (Beamforming).
- MIMO.

Con el objeto de permitir que el sistema en su totalidad verifique el estado de la red en función de las necesidades instantáneas de un usuario determinado, en un punto determinado del área de cobertura, con el procesamiento adecuado: la red debe responder brindando el mayor ancho de banda posible (en función de las necesidades), la mejor cobertura y el mejor enlace (camino) para brindar un nivel de señal adecuado al ancho de banda necesario.

Estas tecnologías se plantean dentro de un esquema de múltiples entradas y múltiples salidas MIMO y es necesario evaluar soluciones a diversas problemáticas

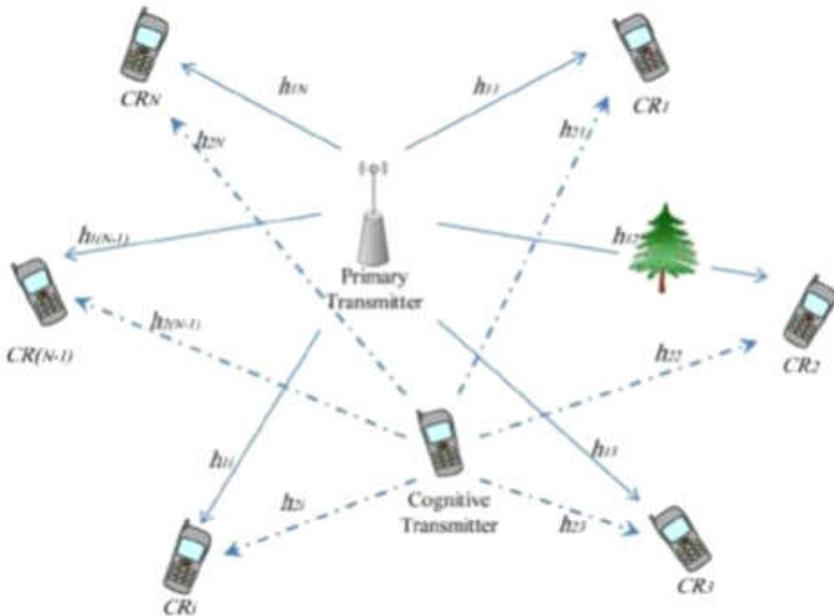


Figura 1: Estructura de radio cognitiva con dispositivos móviles. (Yu,2011).

La problemática de informar a la red

Sin duda para un esquema como el que se plantea, la red debe tener un sistema de procesamiento basado en la información instantánea de cada nodo, por ejemplo las CR (Radio Cognitiva). CSI (*Channel State Information*-Información del Estado del Canal) es una porción de las tramas que brinda información del Estado del Canal en cuanto a los parámetros de *uplink* y *downlink*, pero que actualmente carece de información sobre la propia demanda de ancho de banda. Tomando en consideración el trabajo de Jia et al. (2016), plantea una solución alternativa para las problemáticas de selección del relay adecuado y del alojamiento del espectro, y propone una resolución heurística y centralizada. Así, se puede orientar la problemática emergente de alojamiento de recursos, promoviendo una innovación en el protocolo MAC para su implementación en sistemas basados en Universal Software *Radio Peripheral* (USRP). Los resultados experimentales demuestran que el rendimiento de la totalidad del sistema se incrementa notoriamente mediante el uso de *Relay* Cooperativo, que consiste en que cada relay comparta información del estado del canal con los demás y pueda retransmitir información proveniente de otros.

En el trabajo anteriormente citado, se diseñó un protocolo MAC basado en la presunción de una sincronización global, lo cual es muy simple de implementar considerando la existencia de un nodo central en la red.

El tiempo se divide en tramas; en el comienzo de cada trama, los nodos secundarios se comunican con un canal común de control para intercambiar mensajes de control y negociar el alojamiento de recursos que incluyen tanto los canales como los *relays*.

Luego, en el tiempo remanente de la trama, el nodo central comunica a los canales asignados cómo conducir la transmisión de datos.

De esta forma se tiene una primera aproximación de una implementación de recolección de información a un esquema centralizado de toma de decisión e implementación en los usuarios finales de radios cognitivas.

La problemática de la asignación de rutas

Lograr un redireccionamiento de datos en la red que sea energéticamente eficiente y que permita una construcción de rutas en forma conjunta, asignación de los consiguientes *relays* de la ruta y asignación de potencia, es otro de los desafíos fundamentales. Xu et al. (2016), plantean la definición de un nuevo ancho de banda en forma cooperativa con múltiples caminos de enrutamiento (BP-CMPR) y demuestra formalmente una respuesta en NP-hardness (compleja de tiempo polinomial no determinista). Presentan un algoritmo polinomial heurístico de tiempo CMPR para encontrar K caminos de Rutas de nodo- disjuntos de peso mínimo desde origen hasta destino en un gráfico ponderado.

La problemática del sentido del espectro

La detección del espectro de manera cooperativa ha demostrado ser un método eficaz para mejorar el desempeño de detección mediante la explotación de la diversidad espacial. Mientras que la ganancia cooperativa mejora la detección y por lo tanto la sensibilidad que se puede obtener, la detección cooperativa puede incurrir en ciertos gastos indirectos asociados a la cooperación. La sobrecarga se refiere a cualquier tiempo adicional de detección, retraso, energía y operaciones dedicadas a la detección cooperativa y cualquier degradación del rendimiento causada por la detección cooperativa.

Arunkumar y Kumaran (2016) analizan el método de cooperación por los componentes fundamentales llamados elementos de detección cooperativa, incluyendo modelos de cooperación, técnicas de detección, pruebas de hipótesis, fusión de datos, canales de control e informes, selección de usuarios y base de conocimientos.

La problemática del balanceo de cargas

En un sistema radio cognitiva en donde el sistema comienza en un nodo central y la red se va expandiendo a través de nodos de usuarios, usados también como *relays*, se podrán definir diferentes niveles de acceso para cada nivel, usuarios primarios y usuarios secundarios de estos. Habiéndose definido por las técnicas anteriormente vistas los caminos adecuados mediante el uso de los dispositivos, se debe establecer un esquema de priorización para que los usuarios secundarios puedan acceder a los canales de los usuarios primarios manteniendo un esquema de prioridad. También se debe prever devolver la prioridad al canal primario una vez

que el canal secundario ha finalizado la utilización. La adecuada selección de los canales, tomando en cuenta las necesidades del usuario primario y del usuario secundario, es lo que analizan Yu et al. (2011), donde se proponen dos esquemas de priorización y balanceo: 1) el esquema de decisión del espectro basado en la detección y 2) el esquema de decisión del espectro basado en la probabilidad. El segundo esquema está basado en la probabilidad medida en relación con el tráfico, de este modo las decisiones que se toman en cuanto al balanceo de carga darán un mejor resultado al tomar en cuenta el tráfico actual y las estadísticas de largo término de tráfico tanto del usuario primario como del usuario secundario. En este trabajo los autores investigan sobre cómo se debe evaluar el tiempo total de sistema para uno basado en la detección y en el esquema de decisión del espectro basado en la probabilidad, cuando se tienen en cuenta interrupciones del usuario primario, detección de errores y capacidad. Con este fin los autores han diseñado esquemas de detección de espectro multiusuario sobre la base de una reanudación predictiva, en un modelo de cola (PRP) M/G/1. Este esquema hace referencia a la capacidad que tiene cada usuario de sensar el espectro en busca de huecos espectrales y de informar al resto o a una estación central. Cada usuario tiene una respuesta a sus requerimientos basado en un modelo de cola, además se conforma con la información obtenida de cada usuario una base datos para aplicar un modelo predictivo de requerimientos. En el marco del análisis propuesto, diseñan los parámetros adecuados para acortar el tiempo total del sistema.

La problemática de la extensión de cobertura mediante formación de haz (BEAMFORMING)

Para completar un esquema de radio cognitiva y cooperativa se requiere que, una vez establecido el ancho de banda y el mejor camino hacia el usuario final, este tenga una adecuada cobertura de señal. Para cumplir este objetivo se plantea la conformación del haz direccionado al usuario final e implementado mediante nodos primarios adecuadamente seleccionados y retransmitiendo señal en un esquema cooperativo que implica la utilización de los dispositivos de transmisión primarios como un arreglo de antenas con parámetros que impliquen la formación de un haz que apunte el máximo nivel de señal hacia el usuario final, como se puede ver en la figura 2

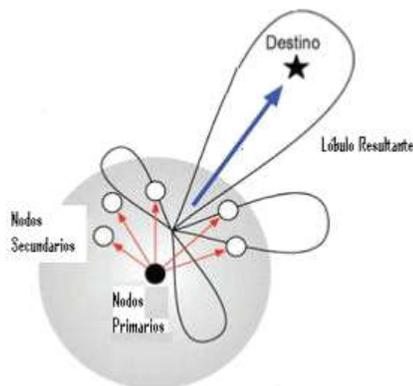


Figura 2: Formación de haz (modificado de www.ece.rutgers.edu/node/1111)

Zeng et al. (2011), derivan las soluciones de forma cerrada para aquellos vectores óptimos de formación de haces y por consiguiente proponen los algoritmos parcialmente distribuidos para implementar la formación óptima del haz, donde cada relé nodo solo necesita la información del canal local y un parámetro global. En segundo lugar, con los canales no recíprocos, se prueba que se pueden alcanzar velocidades de transmisión caracterizadas tanto para el caso de restricción de potencia de suma, como por el poder de potencia individual. Aunque no hay soluciones de forma cerrada disponibles bajo esta configuración, se presentan datos numéricos eficientes.

La formación óptima de haz puede obtenerse por la restricción de potencia suma y con las soluciones óptimas aproximadas bajo las restricciones individuales de potencia.

Conclusiones

Las enunciadas son algunas de las propuestas tecnológicas que aportan la multiplicidad de requerimientos a cubrir para lograr el necesario incremento de las velocidades de transmisión en comunicaciones móviles. Indudablemente las tecnologías pueden variar, pero el esquema de utilización de nodos (relays) que pueden ser los propios dispositivos móviles de los usuarios finales, aprovechando sus antenas para orientar la cobertura en forma colaborativa hacia usuarios con grandes demandas, el análisis de la disponibilidad de ancho de banda de los nodos, para generar centralizadamente caminos en donde se pueda brindar el mayor ancho de banda disponible localmente al usuario demandante y el balanceo de carga en cada dispositivo, para no perjudicar la performance de utilización particular, son los ejes sobre los que las comunicaciones móviles, particularmente la telefonía celular, se encuentran trabajando actualmente, lo que se va a incrementar la posibilidad de brindar servicios de alta velocidad en un futuro cercano.

Referencias

- Arunkumar, A. and Kumaran, S. (January 2016), Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks, *International Journal of Applied Theoretical Science and Technology* Volume 2, Issue 1, pp1012-1018, ISSN: 2454-8065
- Feng, Y. , Yang, Z. , Zhu, W. -P. Li, Q. , and Bin L. (8 June 2016), Robust Cooperative Secure Beamforming for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in Amplifyand Forward Relay Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume PP, Issue: 99.
- Jaber, M., Imran, M. A. , Tafazolli R. and Tukmanov, A. (2016), 5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey, in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1743-1766.
- Jaswal, A., Singh, P. K. and Singh, Y. (2016), 5G: Survey of Technologies and Challenges, *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, ISSN:2278-621x
- Junchen, J., Zhang, J., Zhang, Q. (19-25 April 2009), Cooperative relay for cognitive radio networks, Honk Kong University of Science and Technology. Published in: INFOCOM 2009, IEEE Date of Conference: Added to IEEE Xplore: 02 June 2009 ISSN: 0743-166X
- Xu, H., Huang, L., Qiao. C., Zhang, Y. and Sun, Q. (April 2012), Bandwith-Power Aware Cooperative Multipath Routing for Wireless Media Sensor Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Volume 11, Issue 4, ISSN: 1536-1276

- Yu, Y., Hu, R. Q., Bontu, C. S and Cai, Z. (May 2011), Load-Balancing Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks, *IEEE Communications Magazine*, Volume 49, Issue 5.
- Zaidi, S. and Affes, S. (2015), Distributed collaborative beamforming designs for real-world applications in relayed and cooperative communications, Published in: *Communications and Networking (COMNET)*, 5th International Conference on, Date of Conference: 4-7 Nov. 2015 Date Added to IEEE Xplore: 15 September 2016 ISBN Information: SPEC Accession Number: 16304802 DOI: 10.1109/COMNET.2015.7566622
- Zeng, M., Zhang, R. , and Cui, S. (April 2011), On Design of Collaborative Beamforming for Two-Way Relay Networks, *IEEE Journal on selected areas in Communications*, Volumen 29, Issue 4.

Recibido: julio del 2017

Aceptado: abril de 2018

Propuesta para propiciar capacidades éticas en los Ingenieros en Informática/Sistemas de Información a través de la formación por competencias

Propiciating ethical capacities in Computing/Informatic Engineers by competency-based education: a proposal

Beatriz Parra de Gallo¹

Resumen

El objetivo del presente trabajo es manifestar la necesidad de fortalecer la formación ética de los ingenieros en informática / sistemas de información, habida cuenta de la demanda que en tal sentido surge como requerimiento continuo de la sociedad. Considerando que el modelo educativo de formación por competencias, puede dar una respuesta a esta necesidad, se plantea una propuesta para aplicar la enseñanza por competencias en una asignatura del área de las bases de datos, propiciando la formación de capacidades éticas en los alumnos.

Palabras clave: educación en ingeniería - formación por competencias

Citar: Parra de Gallo, B. (2018). Propuesta para propiciar capacidades éticas en los ingenieros en Informática/Sistemas de Información a través de la formación por competencias. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva Serie.* [Salta - Argentina], núm. 10: 15-27

Abstract

The objective of this paper is to show the need to strengthen the ethical training of computer engineers, taking into account the demand that in this sense arises as a continuous requirement of society. Considering that the educational model of competency-based training can provide an answer to this need, a proposal is made to apply the teaching by competences in a subject in the area of databases, promoting the formation of ethical capacities in the students.

Keywords: education in engineering - competency-based education

¹ Facultad de Ingeniería -UCASAL

Introducción

El objetivo del presente trabajo es mostrar la necesidad de fortalecer la formación ética de los ingenieros en informática / sistemas de información (IISI), habida cuenta de la importancia de la formación ética de los profesionales universitarios y además en respuesta a la demanda que en tal sentido surge como requerimiento continuo de la sociedad.

La formación por competencias está en auge en la educación argentina, y se está estudiando desde el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) desde el año 2006. Se entiende que este nuevo paradigma de la educación universitaria podría lograr una mejor respuesta a la demanda de competencias “blandas” que se piden al ingeniero de hoy, referidas al desarrollo de capacidades de adecuación al entorno, interacción en equipos de trabajo, liderazgo y gerenciamiento con visión estratégica, entre otras.

Este trabajo pretende formular una propuesta concreta de enseñanza de una asignatura del área de base de datos, con inclusión de un modelo de competencias para desarrollar la formación ética de los ingenieros IISI.

La primera parte describe una introducción a la problemática actual de la educación en ingeniería, a modo de interrogantes que deben resolverse. En la segunda sección se aborda la formación por competencias según documentos elaborados por el CONFEDI con la inclusión de aportes de interés de autores latinoamericanos que muestran la vigencia del tema, mientras que en la tercera sección se focaliza el estudio en las competencias que requiere el IISI, además de ahondar el tema desde el punto de vista de la actualización tecnológica. La cuarta sección describe una propuesta de cómo concretar la formación por competencias desde la enseñanza de una asignatura del área de base de datos. Y en la última parte del trabajo se presentan las conclusiones a las que se arribó conjuntamente con las futuras líneas de acción que podrían generarse.

Problemática actual de la educación en ingeniería

La enseñanza de la ingeniería se ha transformado en un proceso dinámico, versátil y altamente complejo que no es ajeno a la situación de cambio de nuestro tiempo, marcado principalmente por el encuentro (o desencuentro) de varios factores que movilizan a la educación en general. García (2017) describe esta situación con toda claridad, y señala que la educación sufre el impacto de fuerzas que tensionan el comportamiento —cada una para su lado— produciendo una redefinición constante del escenario educativo.

A las fuerzas de tensión que señala este autor pueden agregarse un conjunto de interrogantes que usualmente se formulan cuando se discute el modelo educativo de la ingeniería: ¿la sociedad demanda ingenieros técnicos o ingenieros gerentes?, ¿el mercado profesional debe señalar los contenidos a enseñar?, ¿el acceso a las carreras de ingeniería debe ser libre o con cupo?, ¿cómo se responde al avance incesante de instituciones de capacitación no regladas? Desde la gestión educativa de las carreras se pueden agregar otros interrogantes: ¿hasta dónde es beneficiosa la relación universidad/empresa traducida en pasantías laborales?, ¿los procesos de acreditación “uniformaron” a la educación en ingeniería?, ¿la función de la educación superior termina cuando el alumno egresa como profesional?, ¿dónde está el límite entre la libertad de cátedra del docente y el proyecto educativo institucional?

No se acaba aquí la discusión, pero sirve para establecer un marco de referencia.

Todos estos interrogantes pueden considerarse válidos en el contexto de la mayoría de las carreras de ingeniería, pero en el caso particular de la carrera IISI se agrega el componente de la evolución tecnológica que de modo vertiginoso y exponencial abruma y supera por lejos los esfuerzos por formular “planes de estudio actualizados a la época”. Valga como ejemplo el informe Gardner (2012) que señala las 10 tecnologías estratégicas de tendencia, considerando como tales a aquellas con mayor potencial para producir un impacto significativo en la empresa en los siguientes tres años, y detalla: computación móvil, aplicaciones e interfaces centradas en móviles, aplicaciones sensibles al contexto del usuario, internet de las cosas, tiendas de aplicaciones y *marketsplace en la web*, procesos analíticos de ayuda a la toma de decisiones, *big data*, computación *in memory*, servidores de bajo consumo y computación en la nube. ¿Cuánto tiempo demanda formar un profesional IISI con conocimientos suficientes para responder a este escenario? ¿Cómo se puede intentar dar una respuesta a estas demandas?

Pero además de esta problemática propia de las carreras IISI, es necesario incluir en este análisis otras demandas constantes que se le hacen a la educación desde siempre, referidas a la formación de los profesionales de la ingeniería desde la técnica mayormente. Rodríguez et al. (2017) lo indican al hablar de la enseñanza de la ingeniería en Méjico:

Es necesario integrar el conjunto de saberes universitarios en torno a cierto núcleo de valores básicos, que propicien una formación humanística del profesional en valores éticos, morales, porque lo que predomina es el tecnicismo. Se gradúa un Ingeniero, pero no estudió filosofía, ciencias sociales, la historia de su país....

Por su parte, Garnica et al. (2017) en su publicación “El sentido de la enseñanza de las humanidades: una experiencia universitaria” señala “... ¿qué sentido podía tener el encuentro de un profesor interesado en los desarrollos de las ciencias sociales con unos estudiantes de ingeniería que no estaban obligados a compartir dicho interés?...”. Nussbaum (2010) considera que es fundamental que la educación le permita al individuo tomar conciencia de sus responsabilidades como participante activo en una comunidad, que es necesario cultivar, a partir de la educación básica, la facultad de pensamiento crítico de los estudiantes y que a través de una mirada interdisciplinar tome en consideración los aspectos sociales que nos distinguen como personas (equidad, ética, cultura, dignidad humana, bien común).

La formación por competencias de los ingenieros

La literatura que aborda esta cuestión es amplia y diversa. Solo a los fines de ordenar el presente texto, se tomará como base un documento emanado desde las propias carreras argentinas de ingeniería. En este documento de trabajo sobre competencias elaborado por el CONFEDI (2014), se puede leer:

El antiguo paradigma de formación de profesionales basado en la enseñanza como simple esquema de transferencia de conocimientos que el alumno oportunamente sabrá abstraer, articular y aplicar eficazmente, ha ido perdiendo espacio en la realidad actual. La visión

actual de la sociedad propone ver al egresado universitario como un ser competente (con un conjunto de competencias), capaz de ejercer su profesión en la realidad que lo rodea.” Vale también recuperar la definición de “competencia”, tal como la formula este documento: “Competencia es la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales”.

En ese documento citado, el CONFEDI detalla diversos aspectos de las competencias: estas aluden a capacidades complejas e integradas, están relacionadas con saberes (teórico, contextual y procedimental), se vinculan con el saber hacer (formalizado, empírico, relacional), están referidas al contexto profesional (entendido como la situación en que el profesional debe desempeñarse o ejercer), están referidas al desempeño profesional que se pretende (entendido como la manera en que actúa un profesional técnicamente competente y socialmente comprometido) y permiten incorporar la ética y los valores.

Esta definición se completa con la mirada de otros autores, como Chavarría et al. (2017) quienes señalan la necesidad de dotar al ingeniero de herramientas de interacción con sus pares, con profesionales de otras disciplinas y con todos los individuos. Su capacidad de aprendizaje autónomo, debe ir más allá, fomentado la capacidad para autoevaluarse y cambiar aspectos que no favorecen esa interacción con la comunidad.

Hay otros aportes muy interesantes, como el que realizan Dominighini et al. (2017) que abordan la las competencias que deberían tener los “investigadores en el área TIC”. Marcan expresamente las implicancias éticas de la investigación, tomando la responsabilidad como la base para una nueva ética relacionada –no solamente con el medio ambiente– sino principalmente con la formación en ‘valores’. Es interesante considerar la RSU (Responsabilidad Social Universitaria) y la RSE (Responsabilidad Social Empresaria) desde la educación de la ética, con caracteres distintivos de universalidad, prescriptividad y la educación en valores, todo ello ajustado a costumbres y normas sociales específicas para un contexto o grupo social. Esta idea se concreta con estos dichos: “... Ante un hecho que sea de tipo fraudulento y nuevo a la luz de los avances tecnológicos, nos preguntamos: ¿quién toma la decisión?, ¿cuáles son los criterios a seguir? y ¿con qué sistemas de valores se tomará la decisión?”

La formación por competencias de los ingenieros en informática / sistemas de información (IISI)

Focalizando el estudio en las competencias del ingeniero IISI, se toma del modelo del CONFEDI aquellas relacionadas con las “competencias tecnológicas”, dando por entendido que la formación técnica y científica es adecuada y suficiente. Y que además se pueden encuadrar en las 10 tecnologías estratégicas de tendencia señaladas por Gartner (2012), pues la mayoría de las carreras IISI han incluido en sus planes de estudio las temáticas referidas a computación móvil, internet de las cosas, tecnología web, procesos analíticos de ayuda a la toma de decisiones, *big data*, *cloud computing*, etc, intentando acercar a los alumnos la última actualización tecnológica.

Considerando el informe Gartner (2017), se observa que las 10 tecnologías estratégicas de tendencia cambiaron sustancialmente en estos 5 años. El informe incluye estas tecnologías:

- Inteligencia artificial (IA) y máquinas de aprendizaje.
- Aplicaciones inteligentes basadas en asistentes virtuales y procesos de negocios autónomos.
- Cosas inteligentes, como robots, aviones y vehículos autónomos con amplia comunicación entre sí
- Realidad virtual y realidad aumentada transformando el modo en que los individuos interactúan entre sí creando un entorno inmersivo.
- Gemelos digitales, modelos de software dinámico que representa un objeto físico o sistema, generando una representación digital cada vez más detallada del mundo real para la simulación, análisis y control.
- Blockchain, es una base de datos compartida que funciona como un libro para el registro de operaciones de compraventa o cualquier otra transacción que promete transformar la “industria” de un negocio.
- Sistemas conversacionales basados en sensores de diversas modalidades (vista, oído, tacto) para reproducir los entornos de interacción entre las personas.
- *Mesh App and Service Architecture*, para desarrollar aplicaciones dirigidas a múltiples usuarios, para múltiples funciones, utilizando múltiples dispositivos y conectándose a través de múltiples redes de comunicación.
- Plataformas tecnológicas digitales, de aplicación obligada para los negocios, reúnen 5 tecnologías: Sistemas de información, experiencia del cliente, análisis e inteligencia, el Internet de las cosas y ecosistemas de negocios.
- Arquitectura de seguridad adaptativa, para hacer frente a la inteligencia artificial, Internet de las cosas, etc.

Ahora bien, si solo se tratara de incorporar conocimientos y herramientas para trabajar en el mundo de la inteligencia artificial y de la virtualidad, sería relativamente fácil.

Más allá de fortalecer la currícula para que nuestros graduados tengan competencias procedimentales para desenvolverse adecuadamente con la tecnología inteligente, ¿qué estamos haciendo desde el punto de vista de la formación social que requerirá el ingeniero IIS a futuro?

La delegación de poder en la tecnología inteligente es una preocupación que ya está presente.

El proyecto “*Partnership On AI to benefit people and society*” fue fundado con el objetivo de estudiar y formular las mejores prácticas en tecnologías de inteligencia artificial, para avanzar en la comprensión del público de la IA, y para servir como una plataforma abierta para la discusión y el compromiso sobre la IA y sus influencias en las personas y la sociedad. A través de una alianza de gigantes: Amazon, Google, Microsoft, Facebook e IBM; el grupo se dedica a fomentar el desarrollo de Inteligencia Artificial de manera responsable (www.partnershiponai.org)

Según Bourdin (2017) la Unión Europea intenta regular la robótica, pues entiende que la expansión de la inteligencia artificial (IA) y de los sistemas inteligentes, autónomos y con capacidad de decisión, replantea un abanico de problemas clásicos propios de la filosofía, relacionados con los dilemas morales.

El desarrollo de tecnología militar con IA avanzada plantea riesgos específicos (éticos, políticos y estratégicos) que no pueden quedar al margen del escrutinio y del debate públicos, según señala Muñoz (2016).

Vale introducir aquí la discusión sobre la ética en la informática planteada por Dominighini et al. (2017), en la que se trata el impacto de la informática en la sociedad desde la óptica de el agravamiento de los problemas más que la solución de los mismos”, “la formulación de políticas y regulaciones para el uso ético de la tecnología”, “el impacto de las tecnologías en los valores humanos y sociales”, y termina planteando interrogantes acerca de si ¿son los conocimientos y los avances científico-tecnológicos vinculados a la informática, fuente de amenazas? o ¿lo es su utilización por otras personas, por los medios políticos y económicos?

Planteado el contexto futuro en el que actuará el ingeniero IISI, se presenta una propuesta para desarrollar competencias destinadas a la formación ética de este profesional.

La literatura que aborda esta cuestión es amplia y diversa. Solo a los fines de ordenar el presente texto, se tomará como base un documento emanado desde las propias carreras argentinas de ingeniería y señaladas en CONFEDI (2014).

Propuesta de desarrollo de competencias destinadas a la formación ética del ingeniero IISI

Retomando las competencias genéricas definidas por el CONFEDI, interesa considerar las denominadas como ‘competencias sociales, políticas y actitudinales’ detalladas como competencias para:

- desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo;
- comunicarse con efectividad;
- actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global;
- aprender en forma continua y autónoma y competencia para actuar con espíritu emprendedor.

Sin restar importancia a ninguna en particular, a los fines del presente trabajo, se aborda la competencia señalada como “Competencia para actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global”.

El documento del CONFEDI identifica además las capacidades —de las cuales se tomarán en cuenta aquellas relativas a la acción ética— que deben desarrollarse en el alumno quien debe ser capaz de:

- comprender la responsabilidad ética de sus funciones.
- identificar las connotaciones éticas de diferentes decisiones en el desempeño profesional.
- comportarse con honestidad e integridad personal.
- respetar la confidencialidad de sus actividades.
- reconocer la necesidad de convocar a otros profesionales o expertos cuando los problemas superen sus conocimientos o experiencia.

La incorporación de estas competencias en la currícula no es una tarea sencilla, ya que el modelo educativo por competencias implica una profunda modificación en todo el contexto de la educación universitaria y en todas las dimensiones de su identidad como tal. Ya sea en las funciones esenciales (formación, investigación y extensión) como en sus componentes (docentes, alumnos, estructura de gestión).

López Ruiz (2011) señala que es necesario un cambio sustancial en la enseñanza universi-

taria, pues hay que formar desde una visión ecosistémica de las competencias, concibiéndolas

... como un sistema de conocimientos, habilidades y actitudes que son utilizados de modo interactivo en la ejecución oportuna de tareas y en la resolución de problemas más o menos complejos en el marco de una determinada situación y movilizando los recursos y medios disponibles en el ambiente específico en que se opera, teniendo en cuenta que este contexto puede ser, en nuestro caso, tanto académico como laboral[...].

Además de la necesidad de considerar la “capacidad de innovación” tanto de la institución como del docente para avanzar sobre la enseñanza basada en competencias, este autor resalta otras características de estas:

- *naturaleza global*; por cuanto se aplican en varias competencias simultáneas en función del nivel de complejidad de la tarea,
- *función teleológica*; en la medida en que van encaminadas a conseguir ciertos fines relacionados con resultados o productos valiosos.
- *funcionalidad*: su sentido final es su uso en la resolución de problemas complejos o en la ejecución eficaz de tareas.
- *contextualización*: se adquieren a partir de su utilización en diferentes ambientes y situaciones inciertas. Una vez dominadas pueden ser transferidas a otros escenarios y situaciones.
- *autenticidad*: los ambientes en los que se aprendan han de ser lo más similares posibles a la vida real, puesto que son aplicadas de manera continua en el entorno cotidiano
- *proyección social*: son adquiridas por los ciudadanos individualmente para, con su uso adecuado, contribuir colectivamente al bienestar social, el crecimiento económico y el desarrollo sostenible con amplio impacto en la comunidad en la cual se inserta.

Ahora bien, hasta aquí quedan claros los objetivos que se persiguen con la formación en competencias éticas para el ingeniero IISI, el desafío es concretarlos, bajar línea en una acción puntual y real en el aula.

Propuesta de desarrollo de las competencias para la ética en un espacio curricular

Al respecto, existen varias investigaciones que pueden tomarse como antecedentes.

Velandia et al. (2016) proponen desarrollar competencias multidisciplinarias a través de temáticas integradoras, con una experiencia de estudio de control de grupos electrógenos dirigida a estudiantes de ingeniería electromecánica enfatizando la responsabilidad en el trabajo colaborativo, y desarrollando competencias de búsqueda, selección y manejo de la información, trabajo en grupo, tolerancia, comunicación y habilidad para resolver problemas.

Argote et al. (2016) abordan el papel de las matemáticas en las currículas de la carrera de Ingeniería en Sistemas de la Universidad Mariana (Colombia), y encuentran que se han conformado “dos planes de estudio paralelos” que avanzan simultáneamente en el dictado de las matemáticas por un lado, y las asignaturas específicas informáticas por el otro, sin la necesaria integración e interconexión transversal de contenidos. Se propone trabajar las matemáticas a partir de la modelización —en particular el modelado de sistemas inteligentes para la toma de

decisiones— para lograr el desarrollo de competencias relacionadas con la formulación y solución de problemas en un contexto determinado.

Silva (2017) describe el desarrollo de diversas competencias a través del Proyecto Integrador, tales como: la formación humanística (calidad en el uso del idioma materno y extranjero), la formación de valores y de la ética profesional, la formación gerencial y de liderazgo, la educación ambiental, la educación estética, la formación emprendedora, entre otras. Todo ello, mediante la integración en el proyecto de asignaturas específicas y transversales por semestre a través de un trabajo colaborativo.

Otro trabajo de interés para esta temática es la propuesta de Herradón Diez et al. (2009) que en la asignatura Políticas de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información, proponen desarrollar competencias específicas relacionadas con la comprensión y análisis de los principales aspectos políticos, sociales, regulatorios y normativos dentro del marco de las telecomunicaciones, considerando además competencias transversales como la capacidad de expresarse correctamente por escrito/realizar una presentación, la capacidad de defensa de argumentos y actitudes de respeto a los derechos humanos y a la igualdad entre las personas.

Considerando el área de las Bases de Datos, como elemento sustancial en la formación de los profesionales IISI, se presenta un marco de acción para incorporar capacidades que ayuden al desarrollo de competencias éticas en el alumno cursante de este espacio curricular.

Las Bases de Datos resultan de mucho interés para el estudiantado, no tienen ese carácter de agregado obligado o complementariedad que tienen las asignaturas ‘humanísticas’ al decir de los propios alumnos, y se recurre a esa buena predisposición por aprender ‘cosas específicas de la carrera’ como un espacio propicio para proponer el desarrollo de competencias ‘no técnicas’.

Debe considerarse a la educación por competencias, como un espacio adecuado para desarrollar integralmente al alumno, considerando todas las dimensiones de la profesionalidad: saber, saber hacer, saber ser, y saber para quién se hace. Este último concepto es el que establece el lazo entre el ingeniero y su contexto.

Tomando el modelo de López Ruiz (2011) la incorporación de la enseñanza de competencias requiere un plan de acción concreto y definido, que consiste en un conjunto de componentes a saber:

Formulación de objetivos formativos

Se deben formular objetivos teóricos (saber), prácticos (saber hacer), actitudinales (saber ser) y de apertura al cambio (saber aprender). En el caso concreto de la enseñanza de las Bases de Datos, estos objetivos se definen como:

teóricos: que el alumno logre adquirir los fundamentos de la modelización de bases de datos relacionales,

- prácticos: que el alumno logre utilizar las herramientas de modelado de datos a su alcance para poner en práctica los conocimientos adquiridos,
- actitudinales: que el alumno logre valorar la importancia del modelado de datos en el contexto de un sistema de información, incentivar la creatividad para el planteo de diseños eficientes, y comprender de forma crítica y reflexiva los principios básicos que fundamentan la

implementación de un sistema de Bases de Datos.

- de apertura al cambio: que el alumno logre sintetizar los principios conceptuales de las bases de datos que le permitan abordar y entender modelos de estructuras de datos no conocidos por él.

Si se pone como objetivo general formar en la ética desde este espacio curricular; a los objetivos actitudinales formulados se les debe agregar capacidades relacionadas con los principios éticos de privacidad, resguardo y seguridad de la información desde sus tres componentes básicos (confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos). Así, se puede agregar como otro objetivo que “el alumno logre diseñar modelos de datos respetando los principios éticos de la privacidad, resguardo y seguridad de los datos contenidos”.

Selección y organización de los contenidos académicos

La propuesta de López Ruiz (2011) se basa en reestructurar los contenidos en base a dos enfoques muy distintos al ordenamiento de contenidos en complejidad creciente. Propone trabajar sobre una “red de problemas” y/o la conformación de “módulos interdisciplinarios”. Para la asignatura en análisis, se adopta la primera opción.

Los contenidos que actualmente se imparten en la asignatura de ejemplo se refieren a los conceptos iniciales de bases de datos, lenguaje de manipulación de datos y procesos de normalización de datos. Estos conceptos se enseñan con mayoría de problemas rutinarios independientes entre sí, bajo la consigna de que “cuanto más practique el alumno más aprenderá a diseñar bases de datos”.

Para enfocar los contenidos a fin de conformar una “red de problemas”, se puede considerar el desarrollo de una base de datos compleja e integrada, que sea posible diseñar a lo largo de todo el curso, acompañando el desarrollo de los conceptos teóricos requeridos. Si además se toma como modelo una base de datos que exija desde el inicio mantener los principios éticos de privacidad, resguardo y seguridad de los datos (historia clínica, registro prontuario de las personas por ejemplo), ayudaría a la generación de las competencias buscadas.

Renovación de la metodología docente

Reorganizar los contenidos de la asignatura, tal como se propone en el apartado anterior, ya es un esfuerzo sustancial para el equipo docente. La enseñanza por competencias implica pasar de la “clase magistral” en la que el docente expone y el alumno escucha, a la clase participativa en la que los roles de participación se invierten: el docente debe ser facilitador y guía del alumno que a su vez debe ser activo, indagativo y protagonista de esa vivencia en clase. Además de incorporar estrategias didácticas innovadoras (mapas conceptuales, foros, wikis, lectura comentada, técnicas de dinámica de grupos para el trabajo en el aula), se aconseja el abordaje del aprendizaje basado en problemas, la enseñanza basada en proyectos y el estudio de casos. Es necesario “abrir” el aula al contexto, de modo que el alumno pueda vivenciar allí mismo lo que le tocará resolver cuando sea profesional, y esto mediante acciones de doble sentido: por un lado recurrir a recursos informativos de uso diario como la prensa, radio, cine y televisión; y por el otro lado invitando a la clase a profesionales o expertos que puedan aportar testimonios y conocimientos relevantes sobre los problemas en estudio.

En este contexto toma relevancia el análisis de la problemática en estudio desde el punto de vista del impacto en las personas y en la comunidad, para reforzar el desarrollo de capacidades orientadas al comportamiento ético y de valores.

Desde el Vicerrectorado Académico del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (2017) se propone el desarrollo de habilidades, valores y actitudes para sus alumnos, en el marco de misión institucional que se formuló como guía de acción. Considerando solo aquellas relacionadas con la capacidad de desarrollar valores referidos a la formación ética, se indica:

En términos generales, responsabilidad es la capacidad de responder, de dar cuenta de nuestros actos. Por lo tanto, la responsabilidad implica saberse responsable ante el prójimo, sopesar al otro en su justa medida. La responsabilidad significa ser y sentirse autor de los propios actos. La responsabilidad implica hacerse cargo en un sentido claro y consciente de los compromisos que se asumen y de las consecuencias de lo que se hace o se pone en práctica, individualmente o en grupo.

Esta capacidad se traduce en definiciones operacionales que se comunican a los alumnos a fin de que:

- Cumplan cabalmente los compromisos que contraen libremente.
- Se hagan cargo de las consecuencias de sus actos, decisiones y opiniones.
- Sean capaces de identificar las condiciones que deberá tener el producto de su compromiso, para cumplirlas y obtener así la satisfacción propia y de la persona con la cual se generó.
- Sean conscientes y formales en sus palabras, decisiones y actos.
- Reflexionen antes de actuar, con el fin de evitar posibles consecuencias indeseables.
- No responsabilicen a otras personas de sus omisiones, errores o fracasos.
- Sean puntuales y cumplan con las fechas límite para terminar las tareas que se comprometieron a llevar a cabo.

El documento señala además qué actividades que permiten fomentar en el alumno la responsabilidad:

... al inicio del curso, entre el profesor y los alumnos se lleva a cabo una planeación de las actividades, y se establecen los acuerdos para la fecha de entrega. Con esta planeación se pretende, por parte del profesor, dejar muy claro lo que se espera de los alumnos, pues en gran medida de ello depende la respuesta que se obtenga por parte de ellos. Al participar en la planeación, los alumnos adquieren un compromiso no sólo con el profesor, sino también consigo mismos y con el grupo[...].

De igual modo propone el desarrollo de las capacidades como “tomar conciencia clara de las necesidades del país y de sus regiones, compromiso con el desarrollo sostenible del país y de sus comunidades y compromiso de actuar como agentes de cambio”.

Evaluación de la adquisición de competencias

En la educación por competencias la evaluación está integrada al proceso de enseñanza-aprendizaje y deja de ser una simple medición de la “cantidad de conocimiento” adquirido por el alumno. “Es necesario replantear el proceso de evaluación introduciéndolo como una acción holística, centrada en problemas, interdisciplinaria y combinatoria de teoría y práctica...” dice López Ruiz (2011). Las tres modalidades que tiene la evaluación —diagnóstica, formativa y sumativa— deben orientarse no solo a la valoración de los saberes y la práctica, sino principalmente a la identificación de las restantes competencias: saber ser y de apertura al cambio. Y aquí se agrega la evaluación para conocer la capacidad; para identificar los componentes sociales y éticos que trae y va desarrollando el alumnado durante el curso.

Así, para la asignatura Base de Datos I, el actual sistema de evaluación que consiste en: “aprobar el examen parcial/final previsto que se realiza en laboratorio, con un rendimiento igual o superior al 60% respondiendo todos los ítems solicitados”, se transforma en:

- Evaluación diagnóstica: realizada en la primera clase, se indaga acerca de los conocimientos (objetivos teóricos), las herramientas lógicas y de software (objetivos prácticos), identificación de capacidades creativas, de crítica y reflexión, de conceptos sociales, culturales y éticos (objetivos actitudinales) y la capacidad de adaptación a los cambios (objetivos de apertura al cambio).
- Evaluación Formativa: realizada durante el cursado de la materia, se indaga acerca de los avances logrados por los alumnos en las mismas capacidades indagadas en la evaluación diagnóstica.
- Evaluación sumativa: consiste en un informe integrado sobre la evolución de las capacidades de los alumnos a lo largo de toda la asignatura, invitándolo a realizar su propia autoevaluación y propuesta de mejoras a partir de los aspectos identificados por el mismo.
- Evaluación final: presentación, análisis y discusión sobre la autoevaluación realizada por cada alumno.

Conclusiones

Este ejercicio de introducir la enseñanza por competencias en el área de Base de Datos, es una propuesta puesta a consideración de la comunidad educativa de las carreras de IISI, con el objetivo de mover a la reflexión sobre el tema, habida cuenta de que es necesario avanzar en la enseñanza de la ingeniería por el camino de la formación por competencias.

Se hacen propias las palabras de Cortez (2010) cuando dice:

Trabajar bajo el esquema de competencias, debe ser una oportunidad y una garantía, de que el estudiante que transita por las aulas de los tecnológicos, se apropia de las competencias que demanda la sociedad y el mercado laboral. Que se compromete con su aprendizaje y es autónomo, que hace del aprender una forma de vida. Que respetan la diversidad de opiniones, de preferencias y de géneros, que aprenden a vivir sin violencia, que reclaman sus derechos y denuncian las injusticias. Las ingenieras y los ingenieros que queremos para la generación del bicentenario son profesionistas que se han apropiado de los conoci-

mientos que son el sello de la ingeniería, que utilizan las matemáticas como una herramienta para solucionar problemas de la vida diaria y de su profesión. Que son flexibles, innovadores y utilizan su creatividad para el bien común. Que pueden competir en diversos escenarios y tienen la seguridad suficiente para interactuar con personas de diferentes culturas. Que puede comprender las necesidades sociales y son actores en un entorno y no espectadores. Que respetan el medio ambiente y siguen un comportamiento ético.

La educación por competencias debe dejar de ser tan solo un ‘enfoque pedagógico’ para concretarse en acciones áulicas generadas por los propios actores, en este caso, los docentes de las carreras de IISI.

Las líneas de acción abarcan las cinco dimensiones de la enseñanza:

- El contexto institucional —tanto en las funciones de docencia como de investigación y extensión— debe ser repensado desde las características de integralidad, funcionalidad y sistematicidad que requiere la enseñanza por competencias.
- Los planes de estudio de las carreras IISI deben reformularse no sólo desde la actualización de contenidos, cuanto de la multidisciplinariedad y la interacción con el contexto mediante la apertura de las aulas al medio local y regional de cada carrera.
- Los equipos docentes requieren una formación adecuada, tanto desde el aprendizaje mismo de lo que es una competencia, una capacidad, como de la adaptación de las estrategias didácticas a los casos de estudio y la red de problemas.
- Los alumnos deben tener a su disposición un cúmulo de herramientas que los incentiven a participar activamente en su formación, comprometiéndolos plenamente y con responsabilidad en el proyecto de su formación profesional.
- La infraestructura edilicia de las instituciones educativas debe adaptarse a este nuevo modelo educativo, pero no porque se deban levantar ladrillos, sino porque toda la comunidad educativa debe darle una nueva función a los diferentes espacios tales como los áulicos, los laboratorios y las bibliotecas existentes.

Referencias

- Argote, I., Hernández, G., & Martínez, Á. (2016, November). Matemáticas para la ingeniería de sistemas. *In Congresos CLABES*.
- Bourdin, P. (2017). Robots, inteligencia artificial y ética. En <http://www.elperiodico.com/es/noticias/opinion/robots-inteligencia-artificial-etica-articulo-bourdin-5747045>
- Chavarría, Y. G. M., Vivas, A. M. M., & Gaibor, L. L. V. (2017). Formación-desarrollo de competencia aprender-aprender en el proceso docente educativo de Ciencias Básicas. *REFCalE: Revista Electrónica Formación y Calidad Educativa*. ISSN 2477-8818
- CONFEDI. *Competencias en Ingeniería*. (2014). 1ra edición, Mar del Plata, Universidad FASTA, ISBN 978-987-1312-62-7
- Cortez, C. D. R. V., (2010). *La formación que queremos para las ingenieras y los ingenieros de la generación del bicentenario*. México. Congreso Iberoamericano de Educación, Metas 2021, Buenos Aires.
- Dominighini, C., & Cataldi, Z. (2017). *Ética en la investigación en TICS: Formación en buenas prácticas en ciencia y tecnología*.

- García, J. S. M. (2017). Formación profesional: tensiones y dinámicas sociales. *Revista Internacional de Organizaciones*. (17), 21-42.
- Garnica, A. M., & Tarazona, Á. A. (2017). *El sentido de la enseñanza de las humanidades: una experiencia universitaria*. *Grafía*. 13(2), 82-97.
- Gartner (2012). Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2013. Gartner Symposium/ITxpo, Orlando, Fl. Recuperado de <http://www.gartner.com/newsroom/id/1826214>
- Gartner(2017). Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2017, Gartner Symposium / I Txpo 2016 in Orlando, Florida. Recuperado de <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>
- Herradón Diez, R., Blanco Cotano, J., Pérez Yuste, A., & Sánchez Fernández, J. A. (2009). Experiencias y metodologías en asignaturas b-learning para la formación y evaluación en competencias genéricas en Ingeniería. *La cuestión universitaria* (5), 33-45.
- López Ruiz, J. I. (2011). *Un giro copernicano en la enseñanza universitaria: formación por competencias*.
- Muñoz, M. M. (2016). Riesgos asociados al desarrollo de robots autónomos dotados de inteligencia artificial avanzada en contexto civil y militar. *Ensayos de Filosofía*, 3(1).
- Nussbaum, M. C. (2010). *Sin fines de lucro. Por qué la democracia necesita de las humanidades*. Katz Editores.
- Rodríguez, E. B., & Cano, G. Y. V. (2017). ¿Cómo lograr la formación integral del Ingeniero que demanda el mercado laboral del siglo XXI? *Boletín Científico INVESTIGIUM* de la Escuela Superior de Tizayuca, 2(4).
- Silva, W. F., Barrios, R. L. A., & Sierra, C. A. S. (2017). Estrategia de investigación formativa en educación tecnológica: el caso del Proyecto Integrador. *Itinerario Educativo*. 30(67), 103-121.
- Velandia, M. A. A., Morales, F. H. F., & Duarte, J. E. (2016). Formación de ingenieros interdisciplinarios a través de una metodología activa con temáticas integradoras. *Saber Ciencia y Libertad*, 11(2), 177-187.
- Vicerrectorado Académico del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Recuperado de <http://sitios.itesm.mx/va/dide/documentos/inf-doc/havs.pdf>, página consultada el 18/07/2017.

Recibido: mayo del 2018
Aceptado: octubre de 2018

Estimation of the Pearl-Verhulst Logistic function

Estimación de la función logística de Pearl Verhulst

Mika Haarala¹

Abstract

This paper shows a method to estimate the Pearl-Verhulst function, where we can use a where we can use a linear least squares regression to analyze the set of parameters that is most suitable. We give the mathematical background and two applications: the estimation of the population growth of Salta City and the change of birthrate in Finland.

Keywords: Pearl-Verhulst - logistic function

Resumen

En este artículo se presenta un método para determinar la función de Pearl-Verhulst, haciendo uso de una regresión lineal para analizar el conjunto más adecuado de estimadores más probables. Presentamos sus fundamentos matemáticos y la aplicación a dos casos: la estimación del crecimiento de la población de la Ciudad de Salta (Argentina) y el cambio en la tasa de nacimientos en Finlandia.

Palabras clave: Pearl-Verhulst - función logística

Citar: Haarala, M. (2018). Estimación de la función logística de Pearl Verhulst. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva Serie*. [Salta- Argentina], núm.10: 29-46

¹ Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (IESIING) – Facultad de Ingeniería – UCASAL

Introduction

For some engineering applications, it is necessary to know the population growth of a certain country, city, etc. One quite simple model to do that is the Pearl-Verhulst logistic function (Verhulst, 1838; Pearl and Reed, 1920)

$$N_t = L + \frac{\Delta}{1 + e^{at+b}}, \quad (1)$$

where $0 \leq L < \min(N_t)$ for all $t \in [-\infty, \infty]$ is a lower limits of the model, $U = L + \Delta > \max(N_t)$ for all $t \in [-\infty, \infty]$ is the upper limit of the model, Δ is the difference between the upper and lower limits, and the parameters $-\infty < a < \infty$, $-\infty < b < \infty$ define the shape of the function. We can also write the function (1) as

$$\log\left(\frac{\Delta}{N_t - L} - 1\right) = at + b.$$

If we could know or estimate the upper and lower limits U and L , then it's possible to estimate the parameters a and b using the least squares estimates as

$$Y = \begin{pmatrix} \log\left(\frac{\Delta}{N_{t_1} - L} - 1\right) \\ \vdots \\ \log\left(\frac{\Delta}{N_{t_n} - L} - 1\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = Xu \Leftrightarrow u = (X^T X)^{-1} (X^T Y). \quad (2)$$

Definition of the parameters gives

$$\begin{aligned} 0 &< \min(N_t) - L, \\ 0 &< \frac{\Delta}{\max(N_t) - L} - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

showing existence of the logarithm, which means that there is a solution (because $t_i \neq t_j$ for all $i \neq j$). Actually, the least square solution (2) means that we are using a regression method under Bayesian conditions for Δ and L . Problem arises when we must find Δ (or U) and L without knowing a and b .

Estimates of the derivative

Differentiation of (1) gives

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_t}{\partial t} &= -\frac{a \Delta e^{at+b}}{(1+e^{at+b})^2} \\ &= \frac{a \Delta}{1+e^{at+b}} \left(\frac{1}{1+e^{at+b}} - 1 \right).\end{aligned}$$

We can see, that the derivative is zero when $at+b = \infty$ (i.e. $a < 0, t = -\infty$ or $a > 0, t = \infty$) or $at+b = -\infty$ (i.e. $a > 0, t = -\infty$ or $a < 0, t = \infty$). We can write derivative (3) as

$$\begin{aligned}\frac{a \Delta}{1+e^{at+b}} \left(\frac{1}{1+e^{at+b}} - 1 \right) &= \frac{a}{\Delta} \left(\frac{\Delta}{1+e^{at+b}} + L - L \right) \left(\frac{\Delta}{1+e^{at+b}} + L - L - \Delta \right) \\ &= \frac{a}{\Delta} (N_t - L)(N_t - (L + \Delta)) \\ &= C(N_t - L)(N_t - U) \\ &= q_1 N_t^2 + q_2 N_t + q_3.\end{aligned}\tag{4}$$

This shows that the derivative is a parabolic function of N_t with roots L and U , where q_1 , q_2 and q_3 are coefficients to be determined. With these relations deduced from the derivative, we have

$$Y = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial N_n}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1^2 & N_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_n^2 & N_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = Xq\tag{5}$$

whose mean least square solution is

$$q = (X^T X)^{-1} (X^T Y).\tag{6}$$

Again, we can use the regression method to estimate the factors of parabolic function.

Since $C = q_1$, we could calculate the parameter a . Because of the estimates of the derivatives are biased, it is better to use the factors q_1, q_2, q_3 only to the calculus of the boundaries and solve the both factors a and b with the new regression as we showed above. This approach comprises of two regressions: firstly we apply the regression for the equation (5) to solve the boundaries and then, these boundaries are used as Bayesian conditions in the regression of the parameters a and b .

Scaling

Normally the matrix $X^T X$ in (6) is close to singular because of large values of N_i . We can define a new variable $u_i = N_i / \lambda$, when the scale of derivatives $\partial u_i / \partial t = (\partial N_i / \partial t) / \lambda$ is of the order of $O(1/\lambda)$. Thus, we have a new equation

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial N_i}{\partial t} = \tilde{q}_1 \frac{N_i^2}{\lambda^2} + \tilde{q}_2 \frac{N_i}{\lambda} + \tilde{q}_3 \quad (7)$$

which yields to

$$\tilde{Y} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial N_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{1}{\lambda} \frac{\partial N_n}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1^2/\lambda^2 & N_1/\lambda & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_n^2/\lambda^2 & N_n/\lambda & 1 \end{pmatrix} \tilde{q} = \begin{pmatrix} N_1^2 & N_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_n^2 & N_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\lambda^2 \\ 1/\lambda \\ 1 \end{pmatrix} \tilde{q} = XD\tilde{q}, \quad (8)$$

where D is a diagonal matrix.

The factor λ can be any large enough number but we are using $\lambda = 10^{\lfloor \log_{10}(\max(N_i)) \rfloor}$, where $\lfloor \cdot \rfloor$ is a floor function which return the maximum integer less or equal than the real value itself. For example, we get $\lfloor 3.6 \rfloor = 3$.

The least square solution of the equation (8) is now in the form

$$\begin{aligned} (XD)^T XD\tilde{q} &= (XD)^T \tilde{Y} \\ \Leftrightarrow \tilde{q} &= \left((XD)^T XD \right)^{-1} \left((XD)^T \tilde{Y} \right) \end{aligned}$$

From this we can see that

$$\begin{aligned} (XD)^T XD\tilde{q} &= (XD)^T \tilde{Y} \\ D^T X^T XD\tilde{q} &= D^T X^T \tilde{Y} \\ DX^T XD\tilde{q} &= DX^T \tilde{Y} \\ D^{-1}DX^T XD\tilde{q} &= D^{-1}DX^T \tilde{Y} \\ X^T XD\tilde{q} &= \lambda^{-1} X^T \tilde{Y} \\ \lambda D\tilde{q} &= \left(X^T X \right)^{-1} \left(X^T \tilde{Y} \right) = q. \end{aligned} \quad (9)$$

where $D^T = D$ and

$$D^{-1} = \begin{pmatrix} 1/\lambda^2 & & \\ & 1/\lambda & \\ & & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \lambda^2 & & \\ & \lambda & \\ & & 1 \end{pmatrix}.$$

From (9) we see that

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = q = \lambda D \tilde{q} = \begin{pmatrix} \tilde{q}_1/\lambda \\ \tilde{q}_2 \\ \lambda \tilde{q}_3 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

This is the relation between q and \tilde{q} .

Estimation of the parameters

Suppose that $a < 0$. The limits N_∞ and $N_{-\infty}$ can be obtained from (1) as

$$N_{-\infty} = \lim_{t \rightarrow -\infty} \left(L + \frac{\Delta}{1 + \exp(at+b)} \right) = L$$

$$N_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(L + \frac{\Delta}{1 + \exp(at+b)} \right) = L + \Delta = U$$

Similar way, if $a > 0$, then $N_{-\infty} = U$ and $N_\infty = L$. Thus, the roots of the parabolic equation(4) are the limits as $t \rightarrow \pm\infty$. Using weighted variables (10), the parabolic equation (4) is now

$$\frac{\partial N_t}{\partial t} = \frac{\tilde{q}_1}{\lambda} N_t^2 + \tilde{q}_2 N_t + \lambda \tilde{q}_3 = 0,$$

which has roots

$$U = -\frac{\lambda \tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} + \sqrt{\left(\frac{\lambda \tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 - \frac{\lambda^2 \tilde{q}_3}{\tilde{q}_1}} = \lambda \left(-\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} + \sqrt{\left(\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 - \frac{\tilde{q}_3}{\tilde{q}_1}} \right),$$

$$L = -\frac{\lambda \tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} - \sqrt{\left(\frac{\lambda \tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 - \frac{\lambda^2 \tilde{q}_3}{\tilde{q}_1}} = \lambda \left(-\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} - \sqrt{\left(\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 - \frac{\tilde{q}_3}{\tilde{q}_1}} \right).$$

The difference Δ gives

$$\Delta = U - L = \lambda \left(2 \sqrt{\left(\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 - \frac{\tilde{q}_3}{\tilde{q}_1}} \right).$$

The maximum derivative can be found as

$$N_{t_{\max}} = \frac{U + L}{2} = \lambda \left(-\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right),$$

when

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{t_{\max}}}{\partial t} &= \lambda \left(\tilde{q}_1 \left(-\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 + \tilde{q}_2 \left(-\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right) + \tilde{q}_3 \right) \\ &= \lambda \left(-\tilde{q}_1 \left(\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 + \tilde{q}_3 \right) \\ &= \lambda \left(-\tilde{q}_1 \left[\left(\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 - \frac{\tilde{q}_3}{\tilde{q}_1} \right] \right). \end{aligned}$$

The time t_{\max} for the maximum derivative is

$$t_{\max} = \frac{1}{a} \left(\log \left(\frac{\Delta}{\frac{U+L}{2} - L} - 1 \right) - b \right) = -\frac{b}{a}.$$

Because of the second derivative is zero at this point, the population rate grows quicker up to this point. So, the rate of population growth increases up until t_{\max} and from this on, it slows down. We call the point as a turning point t_{\max} .

We saw above that we can scale the data in a simple way to avoid problems in the numerical calculations. Moreover, we must remember that the time series do not follow the logistic function if

$$\left(\frac{\tilde{q}_2}{2\tilde{q}_1} \right)^2 - \frac{\tilde{q}_3}{\tilde{q}_1} \leq 0.$$

Estimates for derivatives

One key problem to consider is the estimation of derivatives; we can make it in three ways:

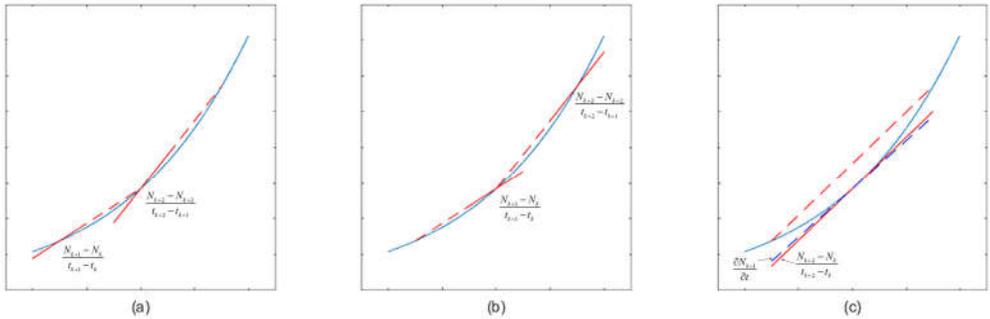


Figure 1: Estimators for the derivative

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} = \frac{N_{k+1} - N_k}{t_{k+1} - t_k}, \quad (a)$$

$$\frac{\partial N_{k+1}}{\partial t} = \frac{N_{k+1} - N_k}{t_{k+1} - t_k}, \quad (b)$$

$$\frac{\partial N_{k+1}}{\partial t} = \frac{N_{k+2} - N_k}{t_{k+2} - t_k}. \quad (c)$$

We can see in the Figure 1, that the case (a) overestimates and the case (b) underestimates the real derivative. . The best estimate can be found by using the estimator (c). This is normally recommended in numerical applications (Press et al, 1992). Despite it being the best choice, it still has small bias (systematic error) as we can see in Figure 1 (c); furthermore it cannot use the edge values; this can be a problem when the time series is short. This is the reason why we write the derivatives in (5) as

$$Y = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{N_2 - N_1}{t_2 - t_1} & \text{at } t_1 \\ \frac{\partial N_2}{\partial t} = \frac{N_3 - N_1}{t_3 - t_1} & \text{at } t_2 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_{n-1}}{\partial t} = \frac{N_n - N_{n-2}}{t_n - t_{n-2}} & \text{at } t_{n-1} \\ \frac{\partial N_n}{\partial t} = \frac{N_n - N_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} & \text{at } t_n \end{pmatrix}.$$

Applications

Population growth in Salta City

The population growth in Salta City, Argentina, starting from the year 1895 is presented in the Table 1 (first row), while the calculated estimates \tilde{N}_t are presented in the second row. We can see in Figure 2 that the curve fit the data quite well.

Table 1: Population growth in Salta City (INDEC)

Year	1895	1914	1947	1960	1970	1980	1991	2001	2010
N_t	20361	33636	76552	123172	182535	265995	373586	472971	536113
\tilde{N}_t	21491	27037	71938	123145	185743	269700	377556	473584	546409

To have an idea about the behavior of the model, we will calculate the estimates with different intervals where the starting point is $t_0 = 1895, 1914, 1947, 1960, 1970$ and the end point is $t_1 = 2010$ in all cases. The resulting curves are printed in the Figure 3 and their estimates and statistics can be found from Tables 2 and 3. In these Tables, F is a ratio of the sum of the squares due to regression to the residual mean square (F -test) and R^2 is the coefficient of determination.

Analyzing Table 2, we can see that the estimates of the limits L and U are biased in the cases 1960 and 1970, hence the results. We observe the same phenomenon in the Figure 3, where the last portion of the curve is drawn in detail in the upper left corner.

Tables 2 and 3 show that the best sample to make the estimations is the interval from 1914 until 2010. But the sample 1947-2010 is also good even though its statistics are a little less significant than the sample 1914-2010. The Table 4 shows that the results obtained considering the sample 1947-2010 (third column), match very well with the data of years 1991, 2001, 2010. If we see the Table 3, R^2 gets good values for all sample sizes, except 1895-2010 one.

In order to select one sample to estimate the population growth rate of Salta for the future, we consider that 1947 sample has lower F value than the 1914 and 1960 samples (even though is close to that of 1914) but at the same time, it has the best . Besides, we realize that $L = 15026$ is smaller than the value 20361 reached for the sample 1895 and the standard deviation is 4386 (Table 4). Taking the sample 1947-2010, we estimate the population of Salta City in 2020 as 596048 inhabitants and 636516 inhabitants in 2030. Moreover, the model expects a maximum number of the inhabitants of 700000.

Table 2: Estimates and statistics for the derivative model

Year	L	U	\tilde{q}_1	\tilde{q}_2	\tilde{q}_3	F	R^2
1895	18725	705697	-0.008 ± 0.001 $t = -10.87$	0.059 ± 0.004 $t = 14.14$	-0.011 ± 0.004 $t = -2.60$	170	98.27%
1914	23843	697930	-0.009 ± 0.001 $t = -10.25$	0.062 ± 0.005 $t = 12.69$	-0.014 ± 0.005 $t = -2.66$	125	98.04%
1947	15026	699924	-0.008 ± 0.001 $t = -11.84$	0.059 ± 0.004 $t = 13.58$	-0.009 ± 0.005 $t = -1.60$	122	98.39%
1960	-4362	707532	-0.008 ± 0.001 $t = -10.85$	0.054 ± 0.005 $t = 11.40$	0.002 ± 0.007 $t = 0.35$	68	97.84%
1970	-48841	720040	-0.007 ± 0.001 $t = -6.11$	0.044 ± 0.008 $t = 5.65$	0.023 ± 0.013 $t = 1.81$	23	95.90%

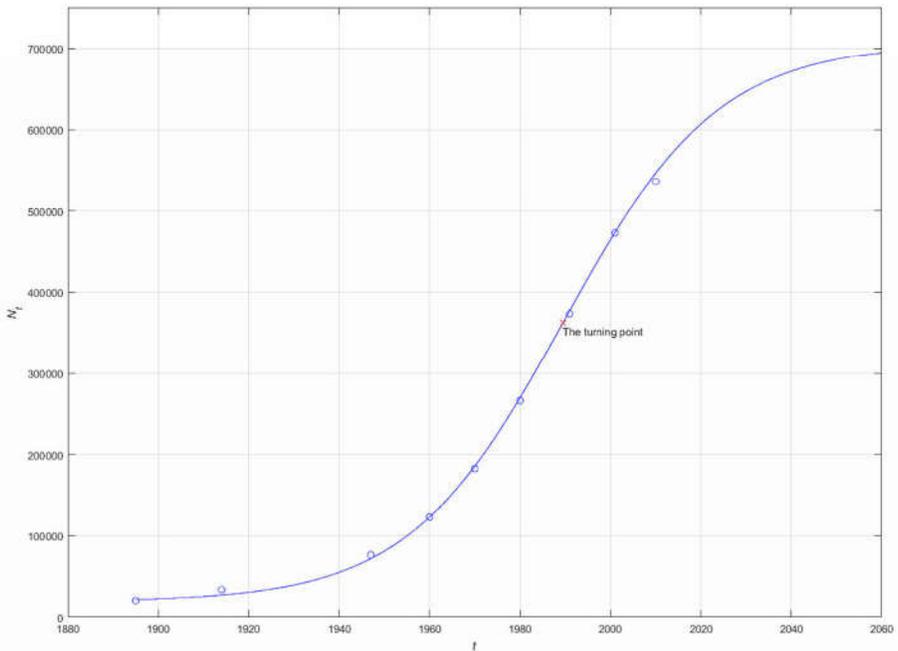


Figure 2: Real and estimated population growth in Salta City

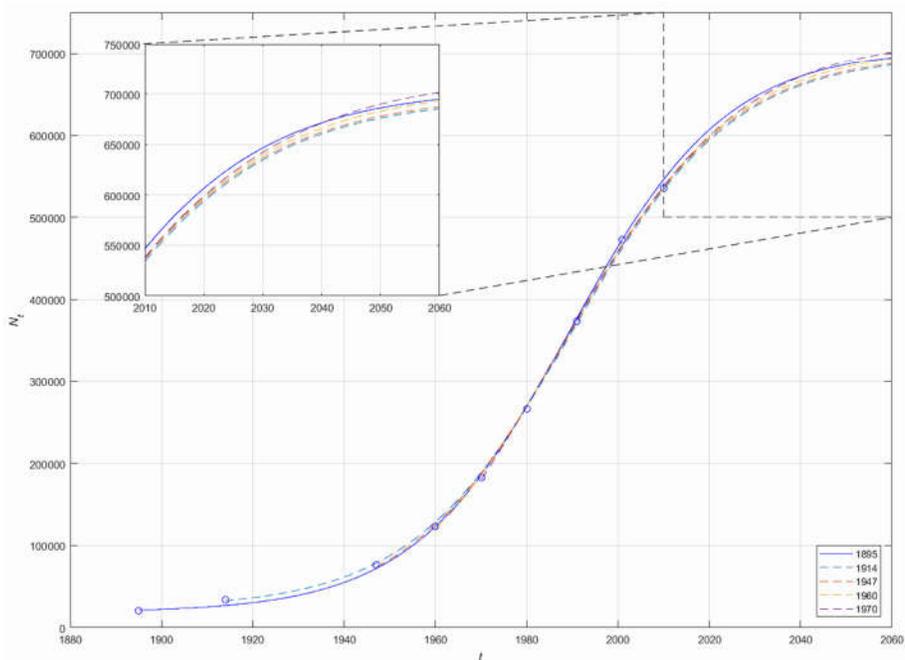


Figure 3: Different estimations for the population growth

Table 3: Bayesian regression results, values of L and U given by Table 2

Year	a	b	F	R^2
1895	-0.058 ± 0.003 $t = -21.07$	5.51 ± 0.21 $t = 25.75$	444	98.45%
1914	-0.057 ± 0.001 $t = -82.95$	4.29 ± 0.04 $t = 97.44$	6880	99.91%
1947	-0.056 ± 0.008 $t = -73.05$	2.37 ± 0.03 $t = 79.40$	5337	99.91%
1960	-0.054 ± 0.001 $t = -76.17$	1.55 ± 0.02 $t = 71.03$	5801	99.93%
1970	-0.051 ± 0.001 $t = -65.78$	0.85 ± 0.02 $t = 44.56$	4328	99.93%

Table 4: Estimates for the samples 1914–2010 (second row) and 1947–2010 (third row)

Year	1914	1947	1960	1970	1980	1991	2001	2010	2020	2030	<i>std</i>
N_t	33636	76552	123172	182535	265995	373586	472971	536113	-	-	-
\tilde{N}_t	32919	78509	128653	188856	268760	371209	463206	534088	593951	634654	5165
$\tilde{\tilde{N}}_t$	-	73399	125916	188243	270038	373701	465903	536541	596048	636516	4386

We must remember that these predictions are based on the hypothesis that the population growth rate of last 120 years will remain unchanged. Of course, it is possible that some perturbations of the estimated path occur (for example, lower birthrate, increasing emigration or immigration, etc.).

Birthrate in Finland

In the second application of the model, we will apply the logistic function in the decreasing case. The quarterly data of the birthrate in Finland is tabulated in Table 5. The three first values of 2018 were reported by Tilastokeskus (Statistics Finland).

Table 5: The quarterly birthrate in Finland on 2002–2017 (Tilastokeskus a)
Numbers of the year 2018 are estimated (Tilastokeskus b)

T_i	$Q_1(T_i)$	$Q_2(T_i)$	$Q_3(T_i)$	$Q_4(T_i)$	<i>Total</i>
2002	13278	14042	14813	13422	55555
2003	13829	14127	14982	13692	56630
2004	14341	14470	15058	13889	57758
2005	14003	14683	15212	13847	57745
2006	14655	14942	15179	14064	58840
2007	14553	14959	15161	14056	58729

T_i	$Q_1(T_i)$	$Q_2(T_i)$	$Q_3(T_i)$	$Q_4(T_i)$	<i>Total</i>
2008	14956	14995	15412	14167	59530
2009	14792	15286	15780	14572	60430
2010	15037	15162	15993	14788	60980
2011	14734	14938	16017	14272	59961
2012	14774	14872	15762	14085	59493
2013	14270	14720	15406	13738	58134
2014	13939	14560	15344	13389	57232
2015	13471	13958	14648	13395	55472
2016	13043	13587	13950	12234	52814
2017	12146	12821	13378	11976	50321
2018*	11644	12094	12438		

We can see from the Figure 4 that each quarterly time series has quite strong variation so they are difficult to model by the Pearl-Verhulst logistic function. . For this reason we give the missing data point as

$$Q_4(2018) = 11976 \times \frac{11644 + 12094 + 12438}{12146 + 12821 + 13378} = 11299.$$

The estimated total sum of the year 2018 (last column in Table 5) is then 47475. The data from the Table 5 including our estimates, are represented in the Figure 4. We can clearly see that all of the curves follow a nonlinear trend. Because of the values of the population size cannot be less than zero, it is quite an attractive idea to apply the Pearl-Verhulst model. Moreover, since we have

$$Q_4(T_i) < Q_1(T_i) < Q_2(T_i) < Q_3(T_i)$$

almost every year except in 2002, the model should be applied to the annual data, to avoid this systematic cycle within the span of a year.

The year when population decrease starts is not so clear, even for 2011 which is the first year to show a decreasing birthrate. We can see from Table 5 that $Q_3(2010) < Q_3(2011)$ and $Q_1(2011) < Q_1(2012)$. If we consider the maxima of each curve, we get the first year for the

population decreases over all four quarters. So, we will present our results for the samples starting 2011 and 2012 and the end year of the samples will be 2016, 2017 and 2018. Because we have only estimated numbers in the case of 2018, we will present 3 different estimated results depending upon the variation of the estimates: (a) 47675, (b) 47475 and (c) 47275. The model does not work with sample 2012–2016. The results are shown in Tables 6 and 7 and in Figure 5.

We can see from the Table 6 that the F-value almost double when we add a new event. Also, when the samples are of the same length (for example samples 2011–2016 and 2012–2017 or 2011–2017 and 2012–2018), the F values are similar. The resultant F values are so high that permit us to state that the logistic model fits very well with data.

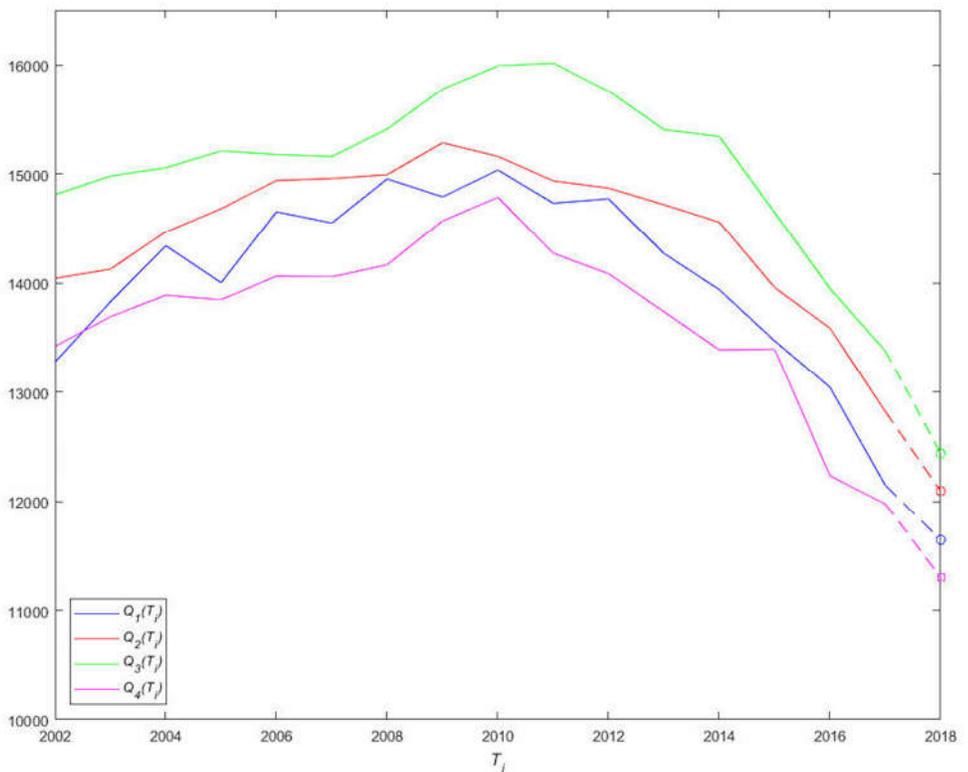


Figure 4: The quarterly birthrate in Finland (2002–2018).

Table 6: Estimates and statistic for the derivative model

Sample	L	U	\tilde{q}_1	\tilde{q}_2	\tilde{q}_3	F	R^2
2011-2016	22946	61372	0.11 ± 0.15 $t = 0.71$	-0.9 ± 1.7 $t = -0.53$	1.5 ± 4.8 $t = 0.31$	45	96.74%
2011-2017	40971	60989	0.26 ± 0.08 $t = 3.09$	-2.6 ± 0.9 $t = -2.85$	6.4 ± 2.5 $t = 2.54$	53	96.37%
2011-2018 (a)	38363	61138	0.21 ± 0.04 $t = 4.71$	-2.1 ± 0.5 $t = -4.33$	4.9 ± 1.3 $t = 3.80$	85	97.14%
2011-2018 (b)	36207	61218	0.18 ± 0.04 $t = 4.36$	-1.8 ± 0.4 $t = -4.36$	4.0 ± 1.2 $t = 3.33$	100	97.55%
2011-2018 (c)	33592	61296	0.16 ± 0.04 $t = 4.00$	-1.5 ± 0.4 $t = -3.52$	3.2 ± 1.1 $t = 2.85$	117	97.90%
2012-2017	32689	62852	0.12 ± 0.18 $t = 0.67$	-1.1 ± 1.9 $t = -0.59$	2.4 ± 5.3 $t = 0.46$	7	82.92%
2012-2018 (a)	33819	62666	0.13 ± 0.09 $t = 1.49$	-1.2 ± 0.9 $t = -1.34$	2.7 ± 2.5 $t = 1.10$	14	87.30%
2012-2018 (b)	29422	62908	0.10 ± 0.08 $t = 1.28$	-1.0 ± 0.9 $t = -1.10$	1.9 ± 2.3 $t = 0.83$	17	89.68%
2012-2018 (c)	23120	63154	0.08 ± 0.08 $t = 1.06$	-0.7 ± 0.8 $t = -0.86$	1.2 ± 2.1 $t = 0.54$	22	91.58%

Table 7: Bayesian regression results for L and U given by Table 6

Sample	a	b	t_{\max}	dN_i/dt	F	R^2
2011-2016	0.40 ± 0.02 $t = 24.35$	-3.29 ± 0.05 $t = -65.54$	Feb 2020	-3900	593	99.33%
2011-2017	0.51 ± 0.02 $t = 33.80$	-2.94 ± 0.05 $t = -54.14$	Oct 2017	-2567	1142	99.56%
2011-2018 (a)	0.47 ± 0.01 $t = 45.70$	-2.94 ± 0.04 $t = -68.04$	Mar 2018	-2698	2089	99.71%
2011-2018 (b)	0.45 ± 0.01 $t = 45.80$	-2.97 ± 0.04 $t = -71.97$	Jul 2018	-2834	2098	99.71%
2011-2018 (c)	0.43 ± 0.01 $t = 45.77$	-3.02 ± 0.04 $t = -76.16$	Dec. 2018	-3007	2095	99.71%
2012-2017	0.34 ± 0.02 $t = 23.47$	-2.09 ± 0.04 $t = -47.29$	Feb 2019	-2688	550	99.28%
2012-2018 (a)	0.36 ± 0.01 $t = 32.89$	-2.11 ± 0.04 $t = -53.40$	Nov 2018	-2679	1082	99.54%
2012-2018 (b)	0.34 ± 0.01 $t = 33.44$	-2.19 ± 0.04 $t = -60.72$	Jul 2019	-2891	1118	99.55%
2012-2018 (c)	0.31 ± 0.01 $t = 33.91$	-2.31 ± 0.03 $t = -69.92$	Jun 2020	-3212	1149	99.57%

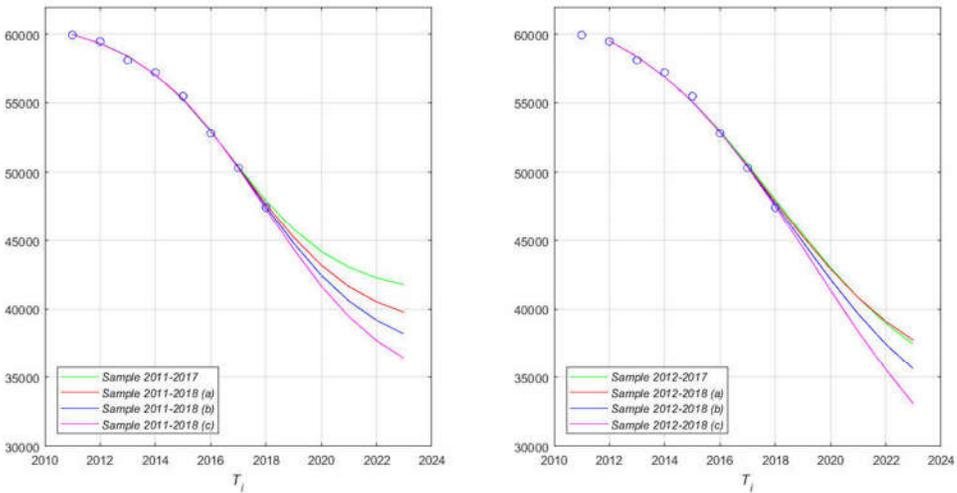


Figure 5: Predictions for the different kind of samples

As Figure 5 and Table 7 show, we get better fit starting the sample from the year 2011. Anyway, the lower limit shows noticeable variations for different samples considered.

The differences between the estimates of years 2019 and 2020 taking the starting points as the years 2011 and 2012, are small, as can be observed in Figure 5. Consequently, it could be difficult to find final estimates before 2021 (official data will be published on 2022). As we mentioned before, the derivative model can have a bias. We will simulate about what would happen if the data follow (A) the path of the sample 2011–2018 (b) or (B) the path of sample 2012–2018 (b). The results are summarized in Table 8.

For the interval 2011–2017 we use the original events (Table 5) and for 2018–2028 the data are estimated following the cases A or B; the columns $N_i^{(case)}$ present the results; if we consider random perturbations (epsilon) we get the results of columns $N_i^{(case)} + \varepsilon$, where the *case* is A or B depending on if the lower level (L) is 36207 or 29422, respectively (see Table 7). Using these artificial data, we calculate the lower limits $L_{2011}^{(case)}(T_i)$ and $L_{2012}^{(case)}(T_i)$ using the samples 2011– T_i and 2012– T_i , respectively.

We can see that the samples starting from the year 2011 give better estimates than the samples which start from the year 2012. But we also see, that they both must indicate the same lower limit. In both cases, we can have good approximate estimates for the lower limit after 2 years from the turning point. That is to say that we will be able to estimate the lower limit in reliable way in the case A, about 2020 (the turning point is July 2018) and in 2021 in the case B (the turning point is July 2019). It seems that the final lower limit will be between 29400 and 36200.

Our result are truncated at to the estimate of the year 2018. We need to wait some months to get the official numbers because the lower limit especially depends on the event of year 2018. In anyway, we need to wait 2–3 years to get the final reliable estimate, of how low the birthrate will

drop in Finland. At the moment, it seems that the birthrate will be 44850 in 2019, 43300 in 2020 and about 40000 in 2021.

Because of the lower limit theoretically takes an infinite amount of time to reach, we can say that the logistic model is invalid when $|\tilde{N}_{t_i} - \tilde{N}_{t_i}| < std$. That is to say, when the curve is close to the lower limit it follows a linear trend. In anyway, it is quite probable that effects of the current trend in Finland, for which the logistic function is provoking, finish before the curve reaches its minimum. But there is impossible to predict that.

Table 8: The lower limit simulation

T_i	$N_{t_i}^{(A)}$	$N_{t_i}^{(A)} + \varepsilon$	$L_{2011}^{(A)}(T_i)$	$L_{2012}^{(A)}(T_i)$	$N_{t_i}^{(B)}$	$N_{t_i}^{(B)} + \varepsilon$	$L_{2011}^{(B)}(T_i)$	$L_{2012}^{(B)}(T_i)$
2018	47511	47447	35871	28678	47695	47631	37923	32971
2019	44815	44752	35308	32239	44897	44834	34331	30159
2020	42468	42641	36667	35554	42170	42343	33964	31823
2021	40590	40596	35177	34186	39650	39656	29754	27006
2022	39186	39219	35811	35310	37435	37468	29936	28404
2023	38188	38062	35540	35165	35573	35447	28829	27593
2024	37505	37487	36019	35806	34065	34047	29604	28922
2025	37049	37092	36127	35975	32880	32923	29654	29174
2026	36749	36806	36163	36045	31971	32028	29619	29257
2027	36555	36499	36076	35974	31286	31230	29382	29078
2028	36429	36287	36043	35957	30777	30635	29303	29056

Conclusion

We gave a double regression method to analyze the probability of the estimates. The future will show how close our estimates will be to the real values of the problems we considered. As we showed in two examples, it is good to analyze the data, rather than merely taking a sample. In that case, we can find the set of parameters that is most suitable (according to the F-test).

It is very important that the data to be used have few interevent variability («less noise»), because in that way, we would have good estimates for the derivatives. Note that the most difficult step of our technique, is to model the derivatives. If the method passes that step reliably, then we can consider our technique to be applicable for the data.

References

- INDEC. Censo Nacional de Población y Vivienda, 1980 y 1991. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2001 y 2010. <http://estadisticas.salta.gov.ar/web/archivos/anuarios/anuario2014-2015/A15c020101.xlsx>. (Last access: 8.11.2018).
- Pearl, R. and L. J. Reed (1920). On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 6, 275-288.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery (1992). *Numerical recipes in FORTRAN: The art of scientific computing*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- Tilastokeskus (a). Elävänä syntyneet, http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__vrm__synt/statfin_synt_pxt_003.px/table/tableViewLayout2/?rxid=308d0b91-07a7-46c6-807c-b161b034225f, (Last Access 9.11.2018).
- Tilastokeskus (b). Väestönmootokset neljännesvuosittain, http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__vrm__vamu/statfin_vamu_pxt_005.px/table/tableViewLayout2/?rxid=6c2b3d86-5c9d-4be3-8fc3-6008576380c4, (Last Access 9.11.2018).
- Verhulst, P. F. (1838). Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement, *Corr. Math. et Phys.* **10**, 113-121.

Recibido: 9/2018
Aceptado: 11/2018

A review on agent-based modeling and simulation

Una breve revisión del Modelado y Simulación basados en agentes

Gustavo Rivadera¹

Resumen

El modelado y simulación basados en agentes, es un enfoque relativamente nuevo para simular sistemas socio-económicos. Su principal ventaja es el uso de entidades autónomas, denominadas agentes, para modelar un sistema, con el que es posible estudiar el comportamiento del mismo y, lo que es más importante, sus propiedades emergentes. Los agentes a menudo representan gente, animales, compañías, entidades naturales, etc., y pueden situarse en un amplio rango de comportamiento que va desde los totalmente autónomos a los básicamente reactivos. La programación de agentes usando reglas de decisión o ciclo de vida, confiere a este enfoque mayor versatilidad y flexibilidad.

Este artículo además de explicar someramente sus principios, muestra el campo de aplicación del mismo, señalando sus ventajas y desventajas.

Palabras clave: Modelado basado en agentes - Simulación socio-económica -sistemas complejos

Citar: Rivadera, G. (2018). Una breve revisión del Modelado y Simulación basados en agentes. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva serie.* [Salta - Argentina], núm 10: 47-55.

Abstract

Agent Based Modeling is a relatively new approach to simulating socio economic systems. Its main advantage is the use of entities called agents to model a system in order to study the behaviour and, most important, the emergent properties of it. Agents often represent people, animals, companies, natural entities, etc., and could be in a wide range from totally autonomous to basically reactive. The programming of agents using decision rules o life cycles makes the approach more versatile and flexible.

¹ Facultad de Ingeniería – UCASAL

This article shows the basic concepts underlying the agent based modeling, its advantages and disadvantages, as well as, the wide range of application of it.

Key Words: Agent Based Modeling - Socio-Economic Simulation -Complex Systems

Introduction

According to Heath and Hill (2009), Agent Based Modeling simulation paradigm emerged from the fields of Complexity, Chaos, Cybernetics, Cellular Automata and Computers, representing a departure from the more classical simulation approaches such as the discrete-event simulation paradigm.

Although computer simulation as an analytical tool has been around since the advent of computers, the ability of the ABM paradigm to simulate complex systems has moved into a breadth of fields ranging from engineering to mathematics to social science and economics. For the first time analysts can use simulation to explore these complex systems at a level of detail that was difficult to achieve before.

Agent-based simulation (ABS), or agent-based modeling (ABM), is a modeling and computational framework for simulating dynamic processes that involves autonomous agents. An autonomous agent acts on its own without external direction in response to situations the agent come across during the simulation.

Modeling a population of autonomous agents, each with its own characteristics and behaviors that extensively interact is a defining feature of an ABS. Agent-based simulation is most commonly used to model individual decision-making, social, and organizational behavior (Bonabeau, 2001).

ABS has gained increasing attention over the past several years as evidenced by the increasing numbers of articles appearing in modeling and applications journals, funded programs that call for agent-based models incorporating elements of human and social behavior, the demand for ABS courses and instructional programs, and the growing number of conferences that feature agent-based modeling, such as the Winter Simulation Conference (WSC) (Macal and North, 2014)

Basic Concepts

Today, computer-simulation in the natural sciences and engineering mostly rely on equation-based modeling (e.g. of the dynamics of gases, fluids, or solid bodies). Such an approach would certainly be hard to transfer to the social sciences, as most system behaviors have not been formalized mathematically. A method that seems to be more suited for the computer simulation of socio-economic systems is agent-based modeling (ABM). The corresponding computational technique is called multi-agent simulation (MAS) or agent-based computational modeling («ABC modeling»).(Helbing and Balmelli, 2015)

In the 1990s, Agent-Based Modeling (ABM) began gaining popularity and represents a departure from the more classical simulation approaches, as stated before. This departure, its recent development and its increasing application by non-traditional simulation disciplines

indicates the need to continuously assess the current state of ABM and identify opportunities for improvement. (Heath and Hill, 2009)

ABM as a modeling technique and paradigm is really still in development. Two key things are needed to mature the ABM paradigm. First, techniques, philosophies and methods need to be developed specifically for ABM and distinguished from other simulation techniques, philosophies and methods. The second is the teaching of ABM techniques, philosophy and methods must improve for those using ABM improve their models (Heath and Hill, 2009).

An agent is a general concept having broad applicability. Agents often represent people, or groups of people. Agent relationships represent processes of social interaction (Gilbert and Troitzsch, 2005).

Fundamental social structures and group behaviors emerge from the interaction of individual agents operating on artificial environments under rules that place only bounded demands on each agent's information and computational capacity (Epstein and Axtell, 1996).

Applications

Applications range from modeling agent behavior in supply chains and the stock market, to predicting the success of marketing campaigns and the spread of epidemics, to projecting the future needs of the healthcare system. Progress in the area suggests that ABS promises to have far-reaching effects on the way that businesses use computers to support decision-making and researchers use agent-based models as electronic laboratories to aid in discovery (Macal and North, 2014).

A broad classification of applications can be obtained from (Helbing and Balmelli, 2015):

- social influence and opinion formation (Mäs, 2010),
- coalition formation (Sichman 1998), (Gaston and Jardins, 2005)
- collective intelligence (Bonabeau, 2000),
- social networks (Szabo and Fath, 2007), (Carrington et al., 2005), (Holme and Ghoshal, 2006)
- group dynamics (Sierhuis et al., 2003),
- social cooperation (Axelrod 1997), (Bowles and Gintis, 2004)
- social norms (Helbing et al., 2010), (Helbing and Johansson, 2009) (Rauhut and Junker, 2009)
- social conflict (Cederman, 1997), (Cederman, 2003)
- financial markets (Hommes, 2006), (LeBaron, 2002), (Raberto et al., 2001)
- competition and cooperation between firms (Zhang, 2005), (Axtell, 1999)
- micro-economic models (Kaihara, 2003), (Preist, 1999)
- macro-economic models (Lebaron et al., 2008), (Tsfatsion, 2002)
- organization and managerial decisions (Harrison et al., 2007)
- migration (Onggo, 2008)
- agglomeration and segregation (Mansury et al., 2002), (Osullivan et al., 2003)
- urban and regional development (Batty, 2007), (Helbing and Nagel, 2004), (Killer et al., 2010)
- traffic dynamics (Binder et al., 2004), (Dia, 2002)
- crowd dynamics (Henein and White, 2005), (Batty, 2003)
- systemic risks in socio-economic systems (Delli, 2008), (Aoki and Yoshikawa, 2006)
- others (Conte et al., 1997), (Sun, 2008), (Gilbert, 2007), (Grimm et al., 2005), (Axelrod, 2005)

Principles of Agent Based Modeling

Authors like Helbing and Balmelli (2015) define several steps or principles for ABM Modeling. First, one should clearly describe the evidence to be explained by the respective study. What are the empirical or experimental data or observations to be reproduced, or what are the «stylized facts», i.e. the simplified, idealized properties of the system under consideration?

Second, one should explain what the purpose of the simulation is. To understand a phenomenon?. To get a more accurate description?. To make predictions?. To develop an application? (e.g. a new traffic control). In the social sciences, it is common to formulate a scientific puzzle, i.e. to describe a problem that is hard to understand and why. This could be an unexpected or even paradoxical individual or system behavior. Emergent system behaviors are particularly interesting candidates for the formulation of such a puzzle («scientific mystery»).

Next, one needs to decide how to choose the agents in the model. For example, when the competition of companies shall be studied, it may not be necessary to simulate all employees of all companies. It may be sufficient to choose the companies as the agents of the model. In fact, it can be shown mathematically (e.g. by eigenvalue analysis) that mutually coupled agents may jointly behave like one entity, i.e. one agent. An example for this is the quasi-species concept in the theory of evolution (Eigen, 1978).

After specifying the agents, one should formulate hypotheses regarding the underlying socio-economic processes or fundamental mechanisms leading to the particular system behavior that needs to be explained. Ideally, these mechanisms should be sociologically or economically justified, i.e. there should be some empirical evidence for the mechanisms on which the agent based model is based. The transfer of models from other sciences (such as spin, epidemic, or synchronization models) requires particular justification beyond saying that the resulting system behavior is reminiscent of features that have been observed elsewhere.

When specifying the mechanisms underlying the multi-agent simulation, one should not put into the model assumptions what one wants to explain. The mechanisms on which the multi-agent simulations are based should be (at least) one level more elementary than the evidence to be understood. For example, the rich-gets-richer effect (Merton 1968) may be used as an ingredient, if class formation shall be described. Moreover, «homophily» (Miller, 2001) may be assumed in models of coalition formation or solidarity. Moreover, social network characteristics may be used to explain the spreading of behaviors (Christakis 2007, 2008), (Smith, 2008). However, if the income distribution is to be explained, it is favorable not to start with the rich-gets-richer effect, but instead with a mechanism that is purely random and not biased in favor of anybody in the beginning. Moreover, even if this is not realistic, it would be interesting to start the computer simulation with identical wealth of everybody (Chadefaux, 2010). Furthermore, if social segregation is to be explained, one should not assume «homophily» already, but to let it evolve in a system that starts off with identical and non-segregated individuals (Helbing and Yu 2009, 2011). Finally, if group formation is to be explained, social network characteristics should not be assumed as an input (Mäs, 2010). They should, for example, result from certain rules regarding the formation and deletion of social ties (Granovetter, 1982), (Fiske, 1991).

Last but not least, one should compare the computer simulation results with the empirical

evidence. Here, one should avoid to be selective, i.e. one should state what are the features that are correctly reproduced, and which ones are not. Pointing out the limitations of a model is equally important as underlining its explanatory power.

Differences with other types of simulation

Helbing (2012) shows some differences with other types of simulations:

Today, computer-simulation in the natural sciences and engineering mostly rely on equation-based modeling (e.g. of the dynamics of gases, fluids, or solid bodies). Such an approach would certainly be hard to transfer to the social sciences, as most system behaviors have not been formalized mathematically. A method that seems to be more suited for the computer simulation of socio-economic systems is agent-based modeling (ABM). The corresponding computational technique is called multi-agent simulation (MAS) or agent-based computational modeling («ABC modeling»). Depending on the problem of interest, agents may for example represent individuals, groups, companies, or countries and their interactions. The behaviors and interactions of the agents may be formalized by equations, but more generally, they may be specified through (decision) rules, such as if-then kind of rules or logical operations. This makes the modeling approach much more flexible.

Besides, it is easily possible to consider individual variations in the behavioral rules («heterogeneity») and random influences or variations («stochasticity»).

To give a clearer picture, let us provide below a list of properties, which may be given to an agent representing an individual:

- Birth, death, and reproduction
- Individual needs of resources (e.g. to eat and drink)
- Competition and fighting ability
- Toolmaking ability (e.g. the possibility to grow food, hunt etc.)
- Perception
- Curiosity, exploration behavior, ability for innovation
- Emotions
- Memory and future expectations
- Mobility and carrying capacity
- Communication
- Learning and teaching ability
- The possibility of trading and exchange
- The tendency to have relationships with other agents (e.g. family or friendship ties etc.)

Criticisms of ABM simulation

Despite all the virtues of mathematical modeling, one should not forget some possible problems (Helbing, 2012). So far, it is not known what phenomena agent-based models, can understand, and what the fundamental limits of this approach are. It is conceivable that there

exist phenomena, which are irreducibly complex (Helbing, 2010). For example, the method of physics to reduce most observations to the behavior of individual particles and pair interactions may not be fully appropriate in socioeconomic systems. Some phenomena require a more integrated treatment of the interactions between many agents. Public good games are just one example (Olson, 1971).

Recent models of pedestrian interactions are also turning away from pair interaction approaches in favor of heuristics that respond to an integrated visual pattern (Moussaýd, 2009).

The corresponding behaviors can still be treated by agent-based models, but one must be aware that they may have fundamental limitations as well.

Conclusion

Due to its characteristics and abilities, some claim that ABM represents a revolution in modeling and simulation. However, this statement is based primarily on the *potential* of ABM rather than *current results* (Banks, 2002).

Nevertheless, there is no reason why analyzing these complex systems using ABM should not eventually always produce meaningful, model-based results.

By extension meaningful results regarding these complex systems will be consistently gained when the proper tools and models are in place, and ABM is, at least for the moment, the most suitable tool for analyzing these types of the complex systems.

References

- Aoki, M. and Yoshikawa, H. (2006). *Reconstructing Macroeconomics: A Perspective from Statistical Physics and Combinatorial Stochastic Processes* (Japan-US Center UFJ Bank Monographs on International Financial Markets), 1st edn. (Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
- Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, 1st printing edn. (Princeton University Press, Princeton, 1997)
- Axtell, R., (1999). The emergence of firms in a population of agents. Working Papers 99-03-019, Santa Fe Institute, March 1999.
- Axelrod, R. (2005). Advancing the art of simulation in the social sciences, in *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management*, ed. by Jean-Philippe Rennard (Hersey, PA, 2005).
- Batty, M. (2003). Agent-based pedestrian modelling, in *Advanced spatial analysis: the CASA book of GIS*, page 81.
- Batty, M. (2007). *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. (The MIT Press, Cambridge, 2007).
- Binder, C.R., Hofer, C., Wiek, A. and R.W. Scholz, R.W. (2004). Transition towards improved regional wood flows by integrating material flux analysis and agent analysis: the case of appenzell ausserrhoden, switzerland. *Ecol. Econ.* 49(1), 1–17.
- Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G. (2000). Inspiration for optimization from social insect behaviour. *Nature*, 406(6791):39–42, July 2000.
- Bonabeau, E., 2001, *Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human*

- Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(3): 7280-7287.
- Bowles, S., and Gintis, H. (2004). The evolution of strong reciprocity: cooperation in heterogeneous populations. *Theor. Popul. Biol.* 65(1), 17–28.
- Carrington, P.J., Scott, J. and Wasserman, S. (2005). *Models and Methods in Social Network Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, February 2005.
- Cederman, L-E. (1997). *Emergent Actors in World Politics: How States and Nations Develop and Dissolve*. (Princeton University Press, Princeton, NJ).
- Cederman, L-E, (2003). Modeling the size of wars: From billiard balls to sandpiles. *Am. Polit. Sci. Rev.* 97, 135–150.
- Chadefaux, T. and D. Helbing, D. (2010). How wealth accumulation can promote cooperation. *PLoS One*, 5(10):e13471, 10 2010.
- Christakis, N.A. and Fowler, J.H. (2007). The spread of obesity in a large social network over 32 years. *The New England journal of medicine*, 357(4):370–379, July 2007.
- Christakis N.A. and Fowler . J.H. (2008) The Collective Dynamics of Smoking in a Large Social Network. *New England Journal of Medicine*, 358(21):2249–2258, May 2008.
- Conte, R., Hegselmann, R. and Terna, P. (1997). *Simulating Social Phenomena*. (Springer, Berlin, 1997).
- Delli Gatti, D. (2008) *Emergent macroeconomics: an agent-based approach to business fluctuations*. (Springer, Berlin, 2008).
- Dia, H. (2002). An agent-based approach to modelling driver route choice behaviour under the influence of real-time information. *Transport. Res. C Emerg. Tech.* 10(5-6), 331–349
- Eigen M. and P. Schuster. *The Hypercycle*. *Naturwissenschaften*, 65(1):7–41, January 1978.
- Epstein, J.M. and Axtell, R. 1996. *Growing artificial societies*. Cambridge, MA, 1996.
- Fiske, A.P. (1991). *Structures of Social Life: The Four Elementary Forms of Human Relations: Communal Sharing, Authority Ranking, Equality Matching, Market Pricing*. (Free Press, 1991).
- Gaston M.E. and des Jardins, M. Agent-organized networks for dynamic team formation. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, AAMAS '05*, pages 230—237, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- Gilbert, N., and K. Troitzsch (2005). *Simulation for the Social Scientist*. McGraw-Hill. 2nd ed.
- Gilbert, N., (2007). *Agent-Based Models*. (Sage Publications, Inc, 2007).
- Granovetter, M. (1982). The strength of weak ties: a network theory revisited. *Sociol. Theor.* 1, 201–233 (1982).
- Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W.M., Railsback, S.F., Thulke, H.H., Weiner, J., Wiegand, T., and DeAngelis, D.L., (2005) Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. *Science* 310(5750), 987.
- Harrison, J.R., Lin, Z., Carroll, G.R. and Carley, K.M. (2007). Simulation modeling in organizational and management research. *Acad. Manag. Rev.* 32(4), 1229.
- Heath B.L. and Hill, R.R., 2009, A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008), *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2009, Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo .
- Heath, B.L. and Hill, R.R. (2009). The emergence of agent-based modeling. *Journal of Simulation*.
- Helbing, D. and Nagel, K. (2004). The physics of traffic and regional development. *Contemp. Phys.* 45(5), 405–426 (2004).
- Helbing, D. and Yu, W. (2009). The outbreak of cooperation among success-driven individuals

- under noisy conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(10):3680–3685, March 2009.
- Helbing, D. and Johansson, A. (2009). Cooperation, norms, and conflict: A unified approach (2009) SFI Working Paper
- Helbing, D., 2010, Pluralistic modeling of complex systems (2010), CCSS-10-009 https://pdfs.semanticscholar.org/83f3/a2fc2e1b94768f15d997ee1f04b3b9e4747c.pdf?_ga=2.148373623.1982513631.1528962778-560646242.1528962778- ultimo acceso: diciembre 2018
- Helbing, D., Szolnoki, A., Perc, M., and Szabó, G., 2010, Evolutionary establishment of moral and double moral standards through spatial interactions. *PLoS Comput. Biol.* 6(4), e1000758,04 (2010).
- Helbing, D., Yu W. and Rauhut, H. (2011). Self-organization and emergence in social systems: Modeling the coevolution of social environments and cooperative behavior. *Journal of Mathematical Sociology*, 35:177–208.
- Helbing, D (Editor). 2012. Social Self-Organization, Agent-Based Simulations and *Experiments to Study Emergent Social Behavior*, Springer 2012.
- Helbing D. and Balmelli S. (2015). How to Do Agent-Based Simulations in the Future: From Modeling Social Mechanisms to Emergent Phenomena and Interactive Systems Design - <https://www.santafe.edu/research/results/working-papers/how-to-do-agent-based-simulations-in-the-future-fr> - último acceso: abril 2017.
- Henein, C.M. and White, T. (2005). Agent-based modelling of forces in crowds, in *Multi-agent and Multiagent-Based Simulation* (Springer, Berlin, 2005), pp. 173–184
- Holme P. and Ghoshal, G., (2006). Dynamics of networking agents competing for high centrality and low degree. *Phys. Rev. Lett.*, 96(9):098701, Mar 2006.
- Hommes, C., (2006). Heterogeneous Agent Models in Economics and Finance, in *Handbook of Computational Economics*, vol. 2, Ch.23- Elsevier, pp. 1109–1186.
- Kaihara, T. (2003). Multi-agent based supply chain modelling with dynamic environment. *Int. J. Prod. Econ.* 85(2), 263–269 (2003).
- Killer, V., Axhausen, K.W., Guth, D. and Holz-Rau, C. (2010). Understanding regional effects of travel times in Switzerland and Germany 1970-2005. Jonkoping, Sweden, August 2010. 50th European Regional Science Association (ERSA).
- Klügl, F. and Bazzan, L.C. (2012), Agent-Based Modeling and Simulation, *AI Magazine*.
- LeBaron, B. (2002). Building the santa fe artificial stock market. *Physica A*, 2002. Working Paper, Brandeis University.
- LeBaron, B. and Tesfatsion, L. (2008). Modeling macroeconomies as open-ended dynamic systems of interacting agents. *Am. Econ. Rev.* 98(2), 246–250 (2008)
- Macal C. and North, M. (2014), Introductory tutorial: agent-based modeling and simulation, *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*.
- Mansury, Y., Kimura, M., Lobo, J., and Deisboeck, T.S. (2002). Emerging patterns in tumor systems: simulating the dynamics of multicellular clusters with an agent-based spatial agglomeration model. *J. Theor. Biol.* 219(3), 343–370 .
- Mäs, M., Flache, A., and Helbing, D. (2010). Individualization as Driving Force of Clustering Phenomena in Humans. *PLoS Comput. Biol.* 6(10), e1000959+ (2010).
- Merton, R.K. (1968). The Matthew effect in science. The reward and communication systems of science are considered. *Science* (New York, N.Y.), 159(810):56–63, January 1968.
- Miller M., Smith-Lovin, L. and James M. Cook, J.M. (2001). Birds of a Feather: Homophily in

- Social Networks. *Annual Review of Sociology*, 27:415–444, 2001.
- Moussaýd, M., Helbing, D., Garnier, S., Johansson, A., Combe, M., and Theraulaz, G., (2009). Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds. *Proc. Biol. Sci. B: Biol. Sci.* 276(1668), 2755–2762.
- Nardini, C., Kozma, B., and Barrat, A. (2008). Who's talking first? consensus or lack thereof in coevolving opinion formation models. *Phys. Rev. Lett.* 100(15), 158701.
- Olson, M., 1971, *The Logic of Collective Action : Public Goods and the Theory of Groups*. Harvard economic studies, v. 124. (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1971).
- Onggo, B.S. (2008). Parallel discrete-event simulation of population dynamics. In *Proceedings of Winter Simulation Conference 2008* (Miami, FL, USA), pp. 1047–1054.
- O'Sullivan, D., Macgill, J.M., and Yu, C. (2003) Agent-based residential segregation: a hierarchically structured spatial model. *Agent 2003 Challenges in Social Simulation*.
- Preist, C., (1999). Commodity trading using an agent-based iterated double auction, in *Proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents (ACM 1999)*, pp. 131–138.
- Raberto, M., Cincotti, S., S.M. Focardi, S.M. and Marchesi, M. (2001). Agent-based simulation of a financial market. *Phys. Stat. Mech. Appl.* 299(1-2), 319–327.
- Rauhut, H. and Junker, M. (2009). Punishment deters crime because humans are bounded in their strategic decision-making. *J. Artif. Soc. Soc. Simulat.* 12(3), 1.
- Sichman, J.S. (1998). Depint: Dependence-based coalition formation in an open multi-agent scenario. *JASSS Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1(2), 1998.
- Sierhuis, M., Bradshaw, J.M., Acquisti, A., van Hoof, R., Jeffers, R. and Uszok, A. (2003). Human-Agent Teamwork and Adjustable Autonomy in Practice. In *Proceedings of the seventh international symposium on artificial intelligence, robotics and automation in space (I-SAIRAS)*, 2003.
- Smith K.P. and N.A. Christakis, N.A. (2008). Social Networks and Health. *Annual Review of Sociology*, 34(1):405–429, 2008.
- Sun, R. (ed.), (2008). *Cognition and Multi-Agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation*, 1st edn. (Cambridge University Press, Cambridge, 2008)
- Tesfatsion, L. (2002). Agent-based computational economics: growing economies from the bottom up. *Artif. Life* 8(1), 55–82.
- Zhang, J. (2005). Growing Silicon Valley on a landscape: an agent-based approach to high-tech industrial clusters. *Entrepreneurships, the New Economy and Public Policy*, pp. 71–90
- Szabo G. and Fath, G. (2007). Evolutionary games on graphs. *Physics Reports*, 446(4-6):97–216, July 2007.

Recibido: diciembre de 2017

Aceptado: junio de 2018

Aislamiento sísmico. Una estrategia eficiente para el cambio de paradigma en la Ingeniería Estructural Sismorresistente

Seismic isolation. An efficient strategy for change of paradigm in earthquake resistant structural engineering

Miguel Eduardo Tornello¹; Gustavo Gioacchini¹

Resumen

En la República Argentina más de las dos terceras partes de su territorio está expuesto al riesgo sísmico. Estudios realizados sobre sismicidades locales y regionales han demostrado el elevado peligro sísmico de importantes provincias del oeste argentino, algunos ejemplos son Mendoza, San Juan, Salta y Jujuy, entre otras. La región conocida como Gran Mendoza, cuenta actualmente, con más de un millón de habitantes y presenta una significativa historia sísmica. En los últimos 200 años han ocurrido no menos de 15 terremotos que ocasionaron distintos niveles de daños en las construcciones y en algunos casos se ha tenido que lamentar la pérdida de vidas humanas. El antecedente histórico más conocido es el terremoto de 1861, que provocó la destrucción total de la ciudad y ocasionó la muerte del 60 % de las personas que la habitaban. El avance tecnológico de los últimos años ha permitido contar con nuevas estrategias para reducir y controlar el efecto de los terremotos destructivos sobre las construcciones emplazadas en regiones con riesgo sísmico. El aislamiento sísmico es una de esas estrategias.

El trabajo presenta la teoría básica del aislamiento sísmico realiza una revisión de los dispositivos de aislamiento más comúnmente utilizados a nivel mundial. Se presenta además una aplicación concreta de aislamiento sísmico para un edificio de tres niveles, de construcción típica en zona sísmica, en el cual se utilizaron dispositivos de aislamiento distintos a los habitualmente empleados en otras zonas sísmicas del continente. Para todos los casos se desarrolla el marco teórico que permite predecir la respuesta sísmica de la construcción aislada. El

Citar: Tornello, M. E. y Gioacchini, G. (2018). Aislamiento sísmico. Una estrategia eficiente para el cambio de paradigma en la Ingeniería estructural sismorresistente. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva Serie.* [Salta- Argentina, núm. 12: 57-104.

¹ Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTec). Departamento de Ingeniería Civil, UTN Facultad Regional Mendoza.

trabajo se completa con información sobre la respuesta del edificio diseñado localmente frente a sismos sensibles ocurridos en la región y su comparación con un edificio idéntico, pero de base fija. Los resultados indican las ventajas del aislamiento sísmico en relación con los sistemas constructivos utilizados tradicionalmente.

Palabras clave: protección sísmica - aislamiento sísmico - terremotos

Abstract

In Argentine Republic, a large part of its territory is exposed to seismic risk. Local and regional seismological studies have shown the high seismic risk of important provinces of western Argentina, some examples are Mendoza, San Juan, Salta and Jujuy, among others. The region known as Gran Mendoza, currently has more than one million population and presents a significant seismic history. In the last 200 years there have been about 15 earthquakes that caused different levels of damage to buildings and in some cases have caused loss of human life. The best known historical antecedent is the earthquake of 1861, which caused the total destruction of the city and the death of 60% of the population. The technological advance of the last years has allowed to have new strategies to reduce and control the effect of destructive earthquakes on the constructions located in regions with seismic risk. Seismic isolation is one of those strategies. The paper presents the basic theory of seismic isolation, performs a review of the most commonly used isolation devices worldwide. In addition, a seismic isolation application for a three-level building of typical construction in a seismic zone is presented in which isolation devices different from those usually used in other seismic zones of the world were used. The paper is completed with information on the response of the building designed locally to sensitive earthquakes in the region and its comparison with an identical building, but with a fixed base. The results show the advantages of seismic isolation in relation to the constructive systems traditionally used.

Keywords: seismic protection - seismic isolation - earthquake

1. Introducción

Hoy, muchos proyectos de ingeniería utilizan técnicas modernas para controlar los efectos de los terremotos, entre ellas, los sistemas pasivos de control de vibraciones (disipadores de energía) y la técnica del aislamiento sísmico (Martelli, 2005) han sido las más utilizadas. Ambas constituyen herramientas eficientes para garantizar la seguridad de las construcciones frente a la ocurrencia de los terremotos. La protección no solo se limita a los elementos estructurales, sino también a los no estructurales y fundamentalmente a los contenidos, en muchos casos de mayor valor económico que la construcción misma.

El objetivo fundamental el aislamiento sísmico consiste en desacoplar la estructura del suelo de fundación, con el objeto de que el movimiento del terreno durante un sismo no sea transmitido a la superestructura y que ella permanezca esencialmente detenida en un marco de referencia inercial (Figura1). Por cierto, un desacople perfecto entre suelo y estructura es im-

practicable actualmente, sin embargo, cualquier sistema de aislamiento busca concentrar en él la deformación impuesta por el movimiento del suelo, filtrando el movimiento que se trasmite hacia la superestructura (Tornello, 2007).

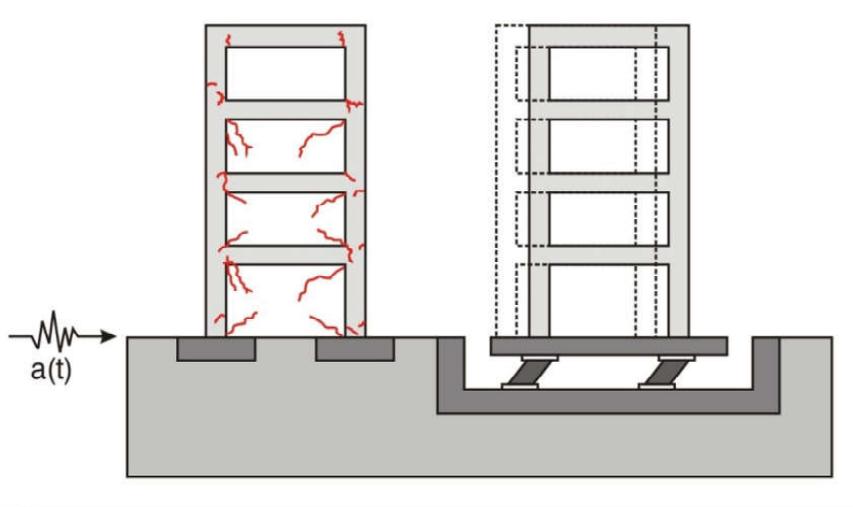


Figura 1. Respuesta de una estructura convencional y una aislada.

Los sistemas de protección sísmica trabajan bajo dos estrategias. La primera es mediante una disipación controlada de la energía que entrega el terremoto y la segunda se concreta a través de modificar las características dinámicas de la obra que se quiere proteger. En algunos casos también se utiliza una combinación de ambas estrategias. La disipación de energía se logra mediante un aumento del amortiguamiento mientras que la segunda, se logra aumentando el periodo y también el amortiguamiento. En la Figura 2, se observa de manera gráfica las estrategias de protección de las estructuras para una idealización de un espectro de aceleraciones y de desplazamientos.

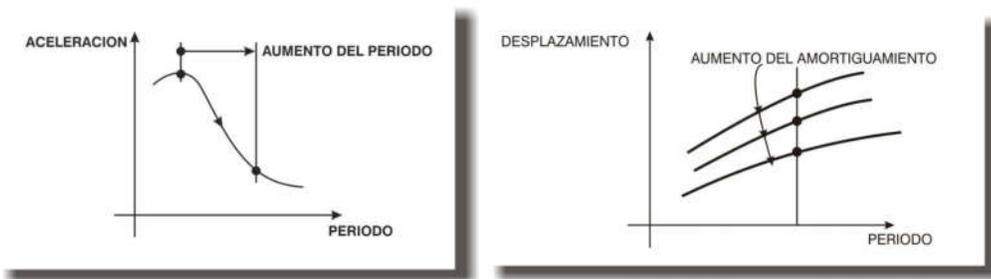


Figura 2. Estrategias de la técnica de los sistemas de protección sísmica

Una de las formas de adicionar amortiguamiento es a través de la disipación de energía denominada histéresis. Esta disipación de energía está representada por el área encerrada entre las curvas de carga y descarga, para el caso de cargas cíclicas. El trabajo realizado durante la etapa de carga, no es totalmente recuperado durante la descarga y la diferencia se pierde, o disipa como calor. La Figura 3 muestra un ciclo idealizado de fuerza versus desplazamiento, donde el área encerrada es una medida de la energía disipada durante un ciclo de movimiento.

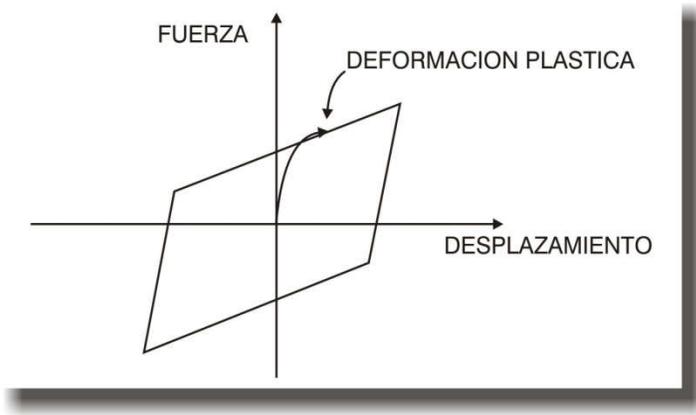


Figura 3. Ciclo de histéresis debido a una deformación plástica.

La implementación de dispositivos de aislamiento sísmico permite reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos, por lo tanto, dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos, situación que garantiza la estabilidad de la estructura aislada, la supervivencia de sus ocupantes y la salvaguarda de sus contenidos.

La estrategia del aislamiento sísmico resulta más conveniente en estructuras con bajos periodos y rigidices importantes. Atento a dicha observación el aislamiento sísmico perseguirá entonces dos objetivos fundamentales, el primero es incrementar el periodo de la construcción y el segundo objetivo será proveerle un mayor amortiguamiento para controlar los desplazamientos de las estructuras aisladas.

2. Base teórica del aislamiento sísmico

El sistema de aislamiento sísmico más simple es aquel en el cual la masa m se encuentra soportada por un dispositivo de baja rigidez a los desplazamientos horizontales x , el cual cumple la función de aislar a la masa de la excitación externa. La acción exterior del terremoto puede representarse por un desplazamiento del suelo con variación sinusoidal u_g . (Figura 4) (Kelly, 1993, 1996).

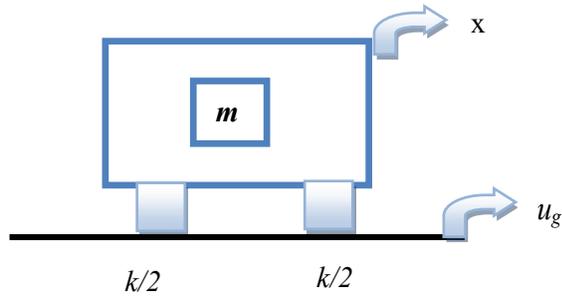


Figura 4. Representación esquemática del aislamiento sísmico.

La efectividad del aislamiento sísmico para proporcionar una protección frente a las vibraciones de la masa m , se cuantifica mediante el concepto de transmisibilidad (T) (ecuación 1 y 2) y se define como la relación entre el valor máximo de los desplazamientos absolutos de la masa y del suelo. La variación de los desplazamientos en el tiempo de la excitación exterior, se admite del tipo sinusoidal (ecuación 1) como también la respuesta en términos de desplazamientos de la masa m (ecuación 2).

$$u_g = \bar{u}_g e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$x = \bar{x} e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$T = \frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} \quad (3)$$

Donde: \bar{x} = Máximo desplazamiento de la masa.
 \bar{u}_g = Desplazamiento máximo absoluto del terreno.
 ω = Frecuencia de la excitación exterior.

La transmisibilidad puede definirse también en término de una relación de aceleraciones absolutas, es decir:

$$\ddot{u}_g = \bar{a}_g e^{i\omega t} \quad (4)$$

$$\ddot{x} = \bar{a} e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$T = \frac{\bar{a}}{\bar{a}_g} \quad (6)$$

\bar{a} = Máximo aceleración de la masa.
 \bar{a}_g = Aceleración máxima absoluta del terreno.

La ecuación de movimiento de la masa, sujeta a la acción del movimiento del suelo, se expresa mediante la ecuación (7). Luego si se define la razón de amortiguamiento crítico por la (8) y la frecuencia natural con (9), la ecuación de movimiento queda expresada con la forma indicada en la (10).

$$m \ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{u}_g) - k(x - u_g) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{c}{2\omega_o m} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (8)$$

$$\omega_o^2 = \frac{k}{m} \quad (9)$$

$$\ddot{x} = -2\omega_o \beta(\dot{x} - \dot{u}_g) - \omega_o^2(x - u_g) \quad (10)$$

Los valores de u_g y x han sido definidos por las ecuaciones (1) y (2) respectivamente, por lo tanto la expresión de amplitud de transmisibilidad queda:

$$\frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} = \frac{1 + 2i\beta\Omega}{1 + 2i\beta\Omega - \Omega^2} \quad (11)$$

Donde: $\Omega = \frac{\omega}{\omega_o}$

ω = frecuencia de la excitación exterior.

ω_o = frecuencia propia del sistema.

El cociente de la suma de complejos tiene solución en el campo real, por lo que la expresión de la amplitud de la transmisibilidad queda expresada por la ecuación (12):

$$T = \left[\frac{1 + 4\beta^2 \Omega^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Si se analiza la ecuación (12) se observa que cuando $\Omega=0$ el valor de $T = 1$. Cuando $\Omega=1$ $T=(1+4\beta^2)^{1/2} / 2\beta$. Cuando β es pequeño, $T \approx 1/2\beta$. Por otro lado cuando $T = 1$, $\Omega^2=2$, independientemente del valor de β , por lo tanto T es siempre menor que uno cuando $\Omega > \sqrt{2}$. Estas variaciones se resumen en la Tabla 1.

La variación de la transmisibilidad T para un vibrador de un grado de libertad, en función de la relación de frecuencias y para distintos valores de β , se observa en la Figura 5. Las unidades del parámetro transmisibilidad se realiza en «decibeles» ($decibeles = 20 \log_{10} T$), por lo tanto es habitual que la representación se realice en escala logarítmica para el eje de las abscisas (Kelly, 1993, 1996). En la Figura 5 puede observarse que el valor de T decrece para valores altos de Ω . Es decir que para valores elevados de Ω , el valor de T disminuye con la relación: $T \approx 2\beta / \Omega$, por lo tanto valores altos de amortiguamiento tienden a reducir la efectividad del sistema de aislamiento para altas frecuencias, sin embargo el amortiguamiento es esencial para limitar la respuesta en el intervalo de la resonancia ($\Omega = 1$).

Tabla 1. Valores límites de la función de transmisibilidad T para amortiguamiento viscoso.

Relación de frecuencias cuando tiende a...	Función de transmisibilidad (T) para amortiguamiento viscoso
$\Omega \rightarrow 0$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow 1$	$T \rightarrow \frac{\sqrt{1+4\beta^2}}{2\beta} \approx \frac{1}{2\beta}$
$\Omega \rightarrow \sqrt{2}$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow \infty$	$T \rightarrow \frac{2\beta}{\Omega}$

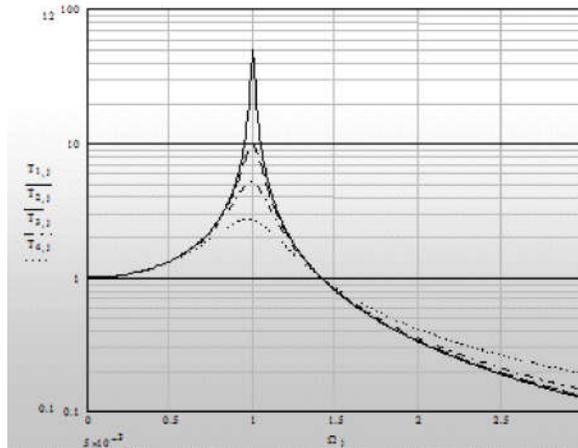


Figura. 5. Variación de la transmisibilidad T de un vibrador de un grado de libertad para amortiguamiento viscoso.

Un modelo de viscosidad lineal no sería adecuado para representar el comportamiento de ciertos tipos de aisladores (por ejemplo los elastoméricos) (Kelly, 1993, 1996), por lo que se hace necesario evaluar las funciones de transmisibilidad con amortiguamiento histerético. Las funciones de transmisibilidad, para ambos tipos de amortiguamiento, son muy parecidas en su forma, sin embargo presentan diferencias, respecto al amortiguamiento viscoso y para valores de Ω tendiendo a uno e infinito.

Para el caso particular de estructuras con aislamiento sísmico es conveniente utilizar procedimientos de cálculos no lineales (método paso a paso o historia de la respuesta en el dominio del tiempo) sin embargo para ciertos tipos de aisladores (elastoméricos), es posible, mediante una linealización de las ecuaciones de movimiento, plantear un sistema lineal equivalente (Kelly, 1991). Existen otros tipos de aisladores, por ejemplo los friccionales en los cuales es complejo linealizar las ecuaciones de movimiento aunque en algunos casos se han propuestos modelos no lineales de un grado de libertad (Bozzo et al, 1990).

La teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad, se basa en considerar dos masas, la m_s que representa la masa de la superestructura y la m_b que considera la masa de la estructura de fundación que se encuentra por encima del sistema de aislamiento incluido el mismo (Figura 6) (Naeim et al, 1999).

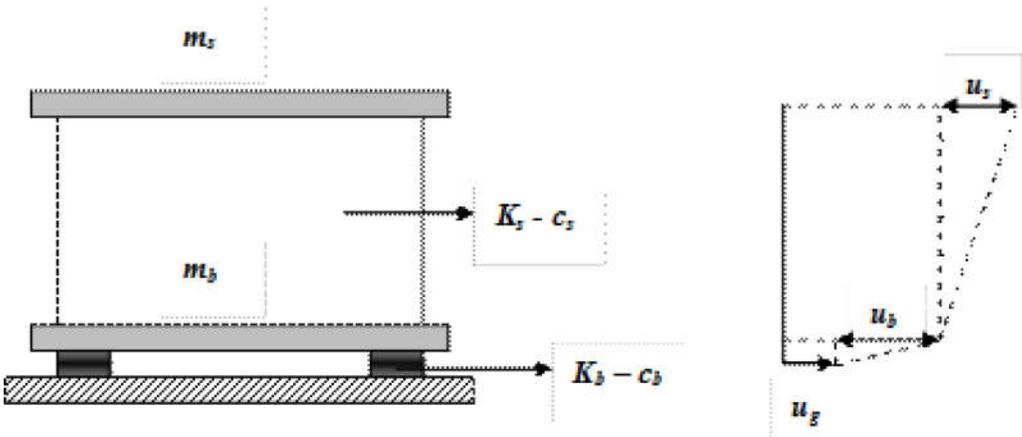


Figura 6. Modelo de 2 GDL para representar la estructura aislada.

En la figura precedente se representa con K_b y K_s , las rigideces del sistema de aislamiento y de la superestructura respectivamente, con c_b y c_s los coeficientes de amortiguamiento viscoso de los dos niveles considerados, u_g , el desplazamiento absoluto del terreno, u_b , el desplazamiento relativo del sistema de aislamiento con respecto al suelo y u_s , el desplazamiento relativo de la superestructura con respecto a la fundación.

Se define:

$$M_t = m_b + m_s \quad (13)$$

La ecuación del movimiento del modelo de dos grados de libertad se expresa como: (14)

$$\begin{aligned} (m_s + m_b) \ddot{u}_b + m_s \ddot{u}_s + c_b \dot{u}_b + k_b u_b &= -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \\ m_s \ddot{u}_b + m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s &= -m_s \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (15)$$

Tratándose de un sistema de dos grados de libertad, es posible explicitar la ecuación (15) mediante una notación matricial (6), expresada sintéticamente mediante la (17):

$$\begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (16)$$

$$M_t \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M_t j \ddot{u}_g \quad (17)$$

En la última ecuación j es el vector que vincula el grado de libertad correspondiente al movimiento del suelo. La solución de la ecuación (17) está asociada a un problema de valores y vectores propios del tipo:

$$(K - \omega^2 M_t) \phi = 0 \quad (18)$$

En la ecuación (18) el valor de ω representa la frecuencia del sistema y j su correspondiente forma modal. La ecuación característica para la frecuencia puede explicitarse de la siguiente forma:

$$\omega^4 (1 - \gamma_m) - \omega^2 \left(\frac{K_b}{m_s + m_b} + \frac{K_s}{m_s} \right) + \frac{K_s}{m_s} \frac{K_b}{(m_b + m_s)} = 0 \quad (19)$$

El factor γ_m define la relación de masas:

$$\gamma_m = \frac{m_s}{(m_s + m_b)} = \frac{m_s}{M_t} \quad (20)$$

La solución de la ecuación (19) proporciona dos frecuencias naturales, asociadas a los dos grados de libertad del sistema. Si se define la frecuencia de la estructura y la del sistema de aislamiento, respectivamente como:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K_s}{m_s}} \quad (21)$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{K_b}{m_b + m_s}} \quad (22)$$

La solución de la ecuación (19) resulta:

$$\omega_{1-2}^2 = \frac{\omega_b^2 + \omega_s^2}{2(1 + \gamma_m)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(1 - \gamma_m)}{(1 + \varepsilon)}} \right] \quad (23)$$

El coeficiente ε de la ecuación (23) representa la relación entre las frecuencias naturales.

$$\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \quad (24)$$

Si se explicita las raíces de la ecuación (23), los valores de las frecuencias naturales pueden expresarse como:

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2 (1 - \gamma_m \varepsilon) \quad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma_m)} (1 + \gamma_m \varepsilon) \quad (25)$$

La rigidez de estructura K_s , es muy alta comparada con la rigidez del sistema de aislamiento K_b , por lo tanto el factor ε tiene un valor pequeño. En general desde un punto de vista práctico es habitual tomar el valor ($\varepsilon = 0.01$) (Kelly, 1991). En consecuencia el cuadrado de dicho valor es muy próximo a cero, el término $(1 + \varepsilon)^2 \cong 1$ y la ecuación (25) queda reducida a las siguientes expresiones.

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2 \quad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma_m)} \quad (26)$$

El valor de ω_1 representa la frecuencia modificada del sistema de aislamiento y la ω_2 la frecuencia modificada de la estructura. De la observación de las anteriores ecuaciones se concluye que el período de una estructura con aislamiento sísmico es similar al período del sistema de aislamiento. Conocidos los valores propios de las frecuencias ω_1 y ω_2 , es posible expresar los vectores propios que permiten resolver el sistema lineal dado por la ecuación (18):

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\varepsilon \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \phi_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ \gamma_m \end{bmatrix} \quad (27)$$

El vector propio correspondiente al primer modo de vibración indica que la totalidad del movimiento lateral de la estructura, se concentra en la base y el desplazamiento relativo entre los restantes pisos es una variable de segundo orden, por lo tanto, es posible considerar que el comportamiento estructural de edificios aislados sísmicamente es similar al de un sólido rígido con desplazamiento lateral concentrado en la base (Bozzo et al., 1990).

Si se utilizan los procedimientos clásicos de la dinámica estructural, los vectores propios (27), permiten desacoplar las ecuaciones del movimiento dadas por las expresiones (16 y 17). Dicho procedimiento conduce a los factores de amortiguamiento modal β y los de participación modal L :

$$\beta_1 = \beta_b (1 - 1.5 \gamma \varepsilon) \cong \beta_b$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}}{(1 - \gamma)^{1/2}} \left(1 - \frac{\gamma \varepsilon}{2} \right) \cong \frac{1}{(1 - \gamma)^{1/2}} (\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}) \quad (28)$$

$$L_1 = 1 - \gamma \varepsilon \cong 1 \quad L_2 = \gamma \varepsilon \quad (29)$$

Los factores de amortiguamiento de la estructura y del sistema de aislamiento incluidos en las ecuaciones (28) pueden expresarse como:

$$2 \omega_b \beta_b = \frac{c_b}{m_s + m_b} \Rightarrow \beta_b = \frac{c_b}{2 \omega_b (m_s + m_b)} \quad (30)$$

$$2 \omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m_s} \Rightarrow \beta_s = \frac{c_s}{2 \omega_s m_s}$$

El valor de γ_m es siempre menor que la unidad y ε , como se citó anteriormente es aproximadamente 0.01, por lo tanto el factor de participación del segundo modo es mucho menor que el del primer modo. Esta situación permite controlar los desplazamientos relativos de piso para estructuras que eventualmente se encuentren vibrando en el segundo modo. Por otro lado, es posible que la excitación sísmica tenga un contenido de frecuencias con un periodo predominante similar al primer modo de la estructura, es decir que la respuesta puede no ser favorable debido a que su valor máximo está condicionado por el coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislamiento β_b (Ecuación 30).

Para diseñar estructuras con aislamiento sísmico es importante tener presente el contenido de frecuencias de los terremotos del lugar donde se emplaza la estructura. Los espectros para suelos blandos presentan una tendencia a aumentar la ordenada espectral según se incrementa el periodo de la estructura, por lo tanto no es recomendable el empleo de aisladores elastoméricos en suelos blandos. La dependencia del contenido de frecuencias del terremoto no resulta tan marcada en otros tipos de aisladores, por ejemplo los friccionales (Bozzo et al., 2000). Los análisis de las respuestas de estructuras con aislamiento sísmico de base se realizan, muchas veces, en el ámbito de la no linealidad de las ecuaciones de movimiento y para ello se utilizan distintos procedimientos.

La extensión de la teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad, tratada en los puntos precedentes, a varios grados de libertad fue formulada por Kelly J. (1993) donde el modelo analítico es similar al de dos grados de libertad. Si se utilizan los mismos conceptos planteados en los puntos precedentes, el planteo matemático puede realizarse en forma matricial.

El amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento y por ende del sistema de aislamiento tiene una importante incidencia en la respuesta de las estructuras aisladas. Investigaciones previas (Naeim et al., 1999; Tornello et al., 2008) indicaron que la cantidad de amortiguamiento del sistema de aislamiento en relación al amortiguamiento crítico depende de las características de los terremotos que puede esperarse en la zona de emplazamiento de la estructura aislada sísmicamente. Por otro lado valores altos de amortiguamiento del sistema de aislamiento puede anular los beneficios de la técnica del aislamiento.

3. Clasificación de los sistemas de control en la respuesta sísmica

Los sistemas de protección sísmica para estructuras utilizados en la actualidad, incluyen desde diseños relativamente simples hasta otros más avanzados, totalmente automatizados. Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en tres categorías: Sistemas activos, sistemas semiactivos y sistemas pasivos.

3.1. Sistemas activos

Los sistemas activos de protección sísmica son complejos debido a que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos. La Figura 7 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación de los sistemas de protección sísmica activos. Estos sistemas monitorean la respuesta sísmica de la estructura en tiempo real, detectando movimientos y aplicando las fuerzas necesarias para contrarrestar los efectos sísmicos.

El actuar de los sistemas activos se resume de la siguiente forma: las excitaciones externas y la respuesta de la estructura son medidas mediante sensores, principalmente acelerómetros, instalados en puntos estratégicos de la estructura. Un algoritmo de control procesa, también en tiempo real, la información obtenida por los instrumentos, y determina las fuerzas necesarias que deben aplicar los actuadores para estabilizar la estructura. Las fuerzas que estos sistemas utilizan son, generalmente, aplicadas por actuadores que actúan sobre determinadas masas.

Una de las principales desventajas de los sistemas activos de protección sísmica, además de su costo, es que necesitan de una fuente de alimentación externa continua para su funcionamiento durante un sismo. No obstante, constituyen la mejor alternativa de protección sísmica de estructuras, ya que permiten ir modificando la respuesta de los dispositivos en tiempo real, lo que implica un mejor comportamiento de la estructura durante el sismo.



Figura 7. Esquema del mecanismo de operación de los sistemas activos.

Los sistemas de protección sísmica activos han sido desarrollados fuertemente en Estados Unidos de Norteamérica y Japón. Son muy utilizados en Japón, donde las restricciones de espacio de las grandes urbes, han detonado la construcción de estructuras de gran esbeltez. La Figura 8 muestra esquemáticamente una estructura protegida con sistemas activos. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

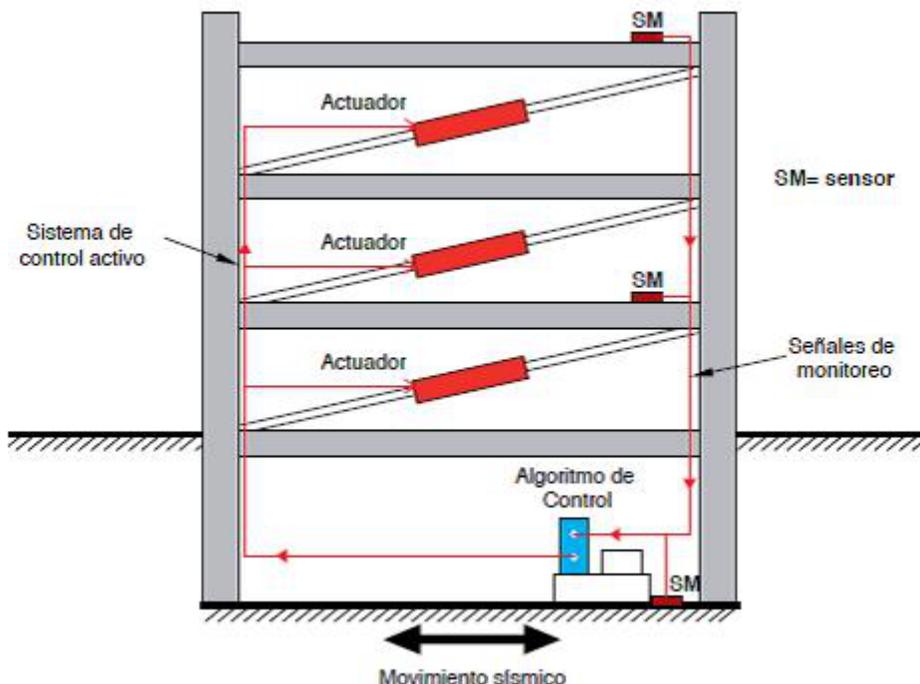


Figura 8. Esquema de estructura con sistema de control activo.

3.2. Sistemas semiactivos

Los sistemas semiactivos de protección sísmica, al igual que los activos, cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural, sin embargo, a diferencia de los sistemas activos no aplican fuerzas de control directamente sobre la estructura. Los sistemas semiactivos actúan modificando, en tiempo real, las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación de energía. Ejemplos de estos sistemas son los amortiguadores de masa semiactivos, los dispositivos de fricción con fricción controlable, y los disipadores con fluidos electro o magneto-reológicos.

La Figura 9 muestra esquemáticamente una estructura protegida con sistema semi-activo. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

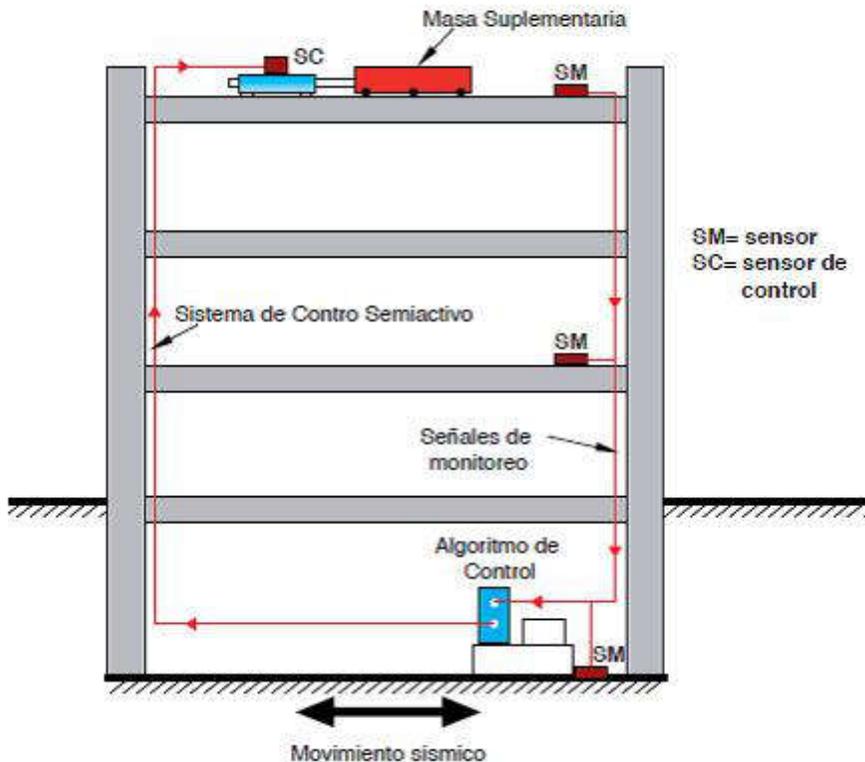


Figura 9. Esquema de estructura con sistema de control semiactivo.

3.3. Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislamiento sísmico de base y los disipadores de energía. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de dispositivos mecánicos especialmente diseñados para disipar energía. Dado que dichos dispositivos son más comúnmente utilizados, en comparación a los sistemas activos y semiactivos, es que serán tratados con mayor detalle en los próximos apartados del presente artículo.

La Figura 10 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación de los sistemas de protección sísmica pasivos.



Figura 10. Esquema del mecanismo de operación de sistemas pasivos.

3.3.1. Disipación de energía

Los disipadores de energía, a diferencia de los aisladores sísmicos, no evitan que las fuerzas y movimientos sísmicos se transfieran desde el suelo a la estructura. Estos dispositivos son diseñados para disipar la energía entregada por terremotos, fenómenos de viento fuerte u otras sollicitaciones de origen dinámico, protegiendo y reduciendo los daños en elementos estructurales y no estructurales. Estos dispositivos permiten aumentar el nivel de amortiguamiento de la estructura.

En la Figura 11 se esquematiza el comportamiento de un edificio con y sin disipadores cuando es sometido a una acción vibratoria. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

Un caso particular de dispositivo de disipación de energía, corresponde a los amortiguadores de masa sintonizada. Estos dispositivos, ubicados en puntos estratégicos de las estructuras, permiten reducir la respuesta estructural.

En la Figura 12 se esquematiza el comportamiento de un edificio con y sin amortiguadores de masa sintonizada (AMS), sometido a una acción vibratoria. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

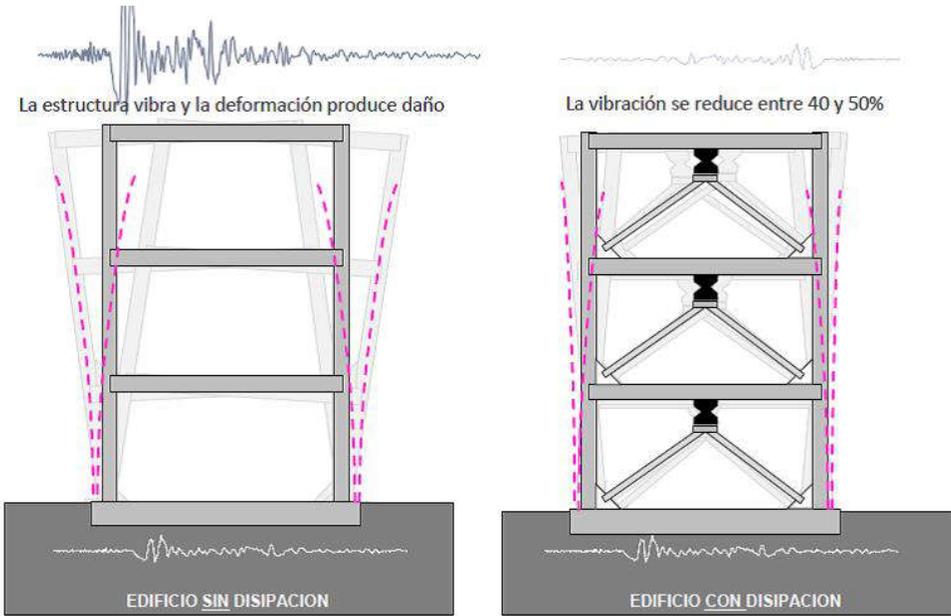


Figura 11. Esquema de edificio con y sin disipadores sometido a un movimiento sísmico

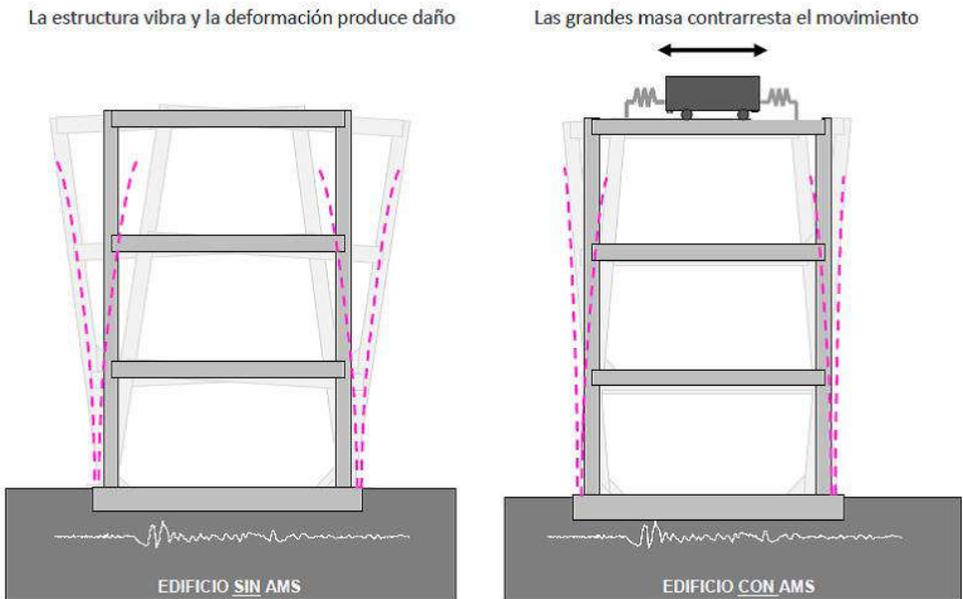


Figura 12. Esquema de edificio con y sin AMS sometido a un movimiento sísmico.

El diseño de estructuras con aislamiento sísmico se fundamenta en el principio de separar la superestructura de los movimientos del suelo o de la subestructura, a través de dispositivos flexibles en la dirección horizontal, generalmente ubicados entre la estructura y su fundación o a nivel del entrepiso del subsuelo (subestructura). Sin embargo, existen casos donde se han colocado aisladores en pisos superiores. La incorporación de aisladores sísmicos permite incrementar el periodo y el amortiguamiento de la estructura aislada.

En la Figura 13 se observa el comportamiento de un edificio con y sin aislamiento sísmico de base, sometido a un movimiento sísmico. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

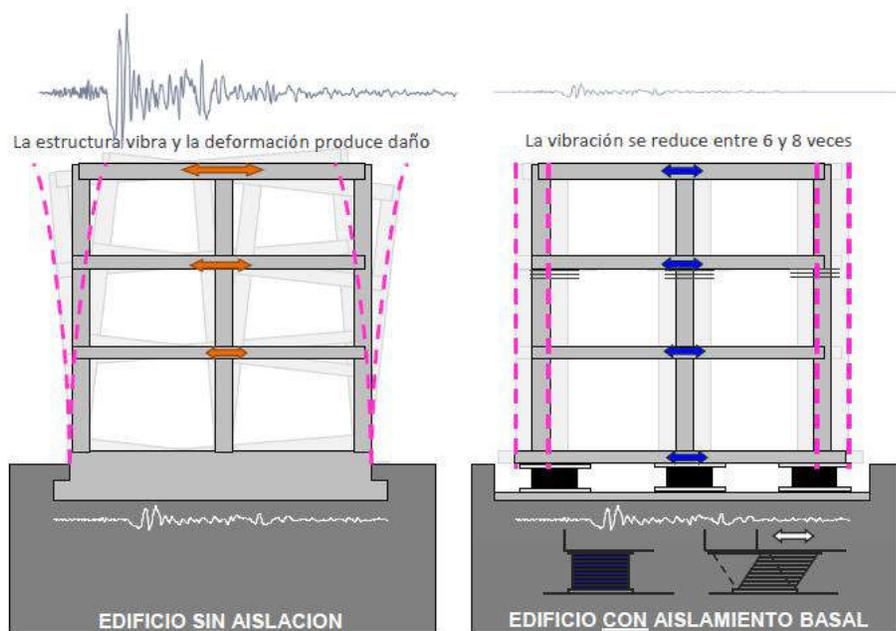


Figura 13. Esquema de edificio con y sin aislamiento sometido a un movimiento sísmico.

El aislamiento sísmico es utilizado para la protección de diversos tipos de estructuras, tanto nuevas como estructuras existentes que requieren un refuerzo estructural o bien una rehabilitación. Cabe aclarar que el uso sobre estructuras existentes no es muy común debido al costo y complejidad que ello implica, sin embargo hay casos en que efectivamente se han desarrollado con éxito (Corte de Apelaciones de San Francisco en los Estados Unidos, Naeim y Kelly, 1999). A diferencia de las técnicas convencionales de refuerzo estructural, el aislamiento sísmico busca reducir los esfuerzos a niveles que puedan ser resistidos por la estructura existente.

3.3.2. Dispositivos más frecuentemente utilizados en proyectos de aislamiento sísmico

El aislamiento sísmico de base es uno de los procedimientos más eficiente para la protección sísmica de estructuras relativamente bajas o rígidas. Los aisladores sísmicos más desarrollados y utilizados en la actualidad son los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (con o sin núcleo de plomo) y los deslizantes o friccionales sin embargo, en los últimos años se han desarrollado un número importante de dispositivos con el mismo objetivo. Los dispositivos más frecuentemente utilizados en los últimos años en las obras de ingeniería son los que se describen en los apartados siguientes:

A. Aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos son uno de los dispositivos más utilizados actualmente en el diseño de estructuras aisladas. Están conformados por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero.

Durante su construcción, las láminas de acero y goma se intercalan horizontalmente dentro de un molde de acero que da la forma geométrica al aislador, que por lo general, presentan una sección circular o cuadrada. Una vez colocadas estas láminas en el molde, se coloca el aislador bajo una prensa y se le aplica presión y temperatura de 140°C por un tiempo que dependerá de la sección del aislador. Durante este proceso la goma se vulcaniza y adquiere su propiedad elástica. Además, el calor aplicado produce la reacción del pegamento epóxico con que han sido cubiertas las láminas de goma y acero. La adherencia debe ser más resistente que la goma misma y la falla por cizalle de un aislador debe ocurrir por deformación en la goma antes que por una falla del pegamento goma-acero. El conjunto de láminas de goma y placas de acero está cubierto en sus extremos superior e inferior por dos placas de acero, en las cuales se conecta con la superestructura en su parte superior y la fundación en su parte inferior.

Mediante esta configuración se logra la flexibilidad lateral necesaria para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura aislada y el suelo. El comportamiento de los aisladores elastoméricos depende de la amplitud de la deformación a la que son sometidos y, en menor grado, de la temperatura, el envejecimiento y la frecuencia del movimiento.

Existen varios tipos de dispositivos elastoméricos, entre ellos se encuentran los de goma natural (NRB, Natural Rubber Bearing), los de goma de bajo amortiguamiento (LDRB, Low-Damping Rubber Bearing) y alto amortiguamiento (HDRB, High-Damping Rubber Bearing), y los de goma con núcleo de plomo (LRB, Lead-plug Rubber Bearing).

A. 1) Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)

Estos dispositivos son los más simples dentro de los aisladores elastoméricos. Los aisladores tipo LDRB presentan bajo amortiguamiento (2-5% como máximo), por lo que generalmente se utilizan en conjunto con disipadores de energía que proveen amortiguamiento adicional al sistema. Estos dispositivos presentan la ventaja de ser fáciles de fabricar. La respuesta de sistemas de aislamiento sísmico conformados por estos tipos de aisladores está influenciada por el valor del amortiguamiento y la rigidez equivalente del aislador (Kelly, 1993, 1996).

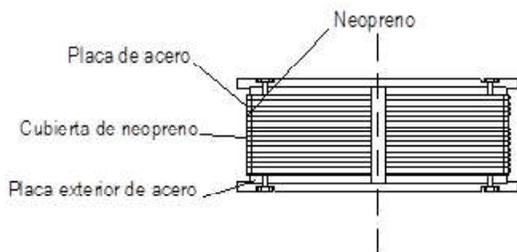


Figura 14. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB).

A. 2. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores con núcleo de plomo (LRB) son aisladores elastoméricos similares a los LDRB pero poseen un núcleo de plomo, ubicado en el centro del aislador, que permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 15%, lo que admite reducir los desplazamientos horizontales y mejorar la disipación de energía (Naeim et al., 1999). Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un terremoto, el núcleo de plomo fluye, incurriendo en deformaciones plásticas, y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras el núcleo de plomo recristaliza. De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico. La Figura 15 muestra los componentes de un aislador elastomérico tipo LRB.

Alejar el período fundamental de un edificio del período predominante de un terremoto no garantiza plenamente la protección de la estructura, debido a una posible resonancia con otras frecuencias naturales más altas (Bozzo et al., 2000). Por lo general diversos terremotos no muestran un período predominante claramente definido y es posible que la presencia de distintos picos espectrales conduzca a amplificaciones dinámicas. Para controlar dichas amplificaciones es oportuna la adición de amortiguamiento, parámetro que permite, de una manera más eficiente, la disipación de energía.

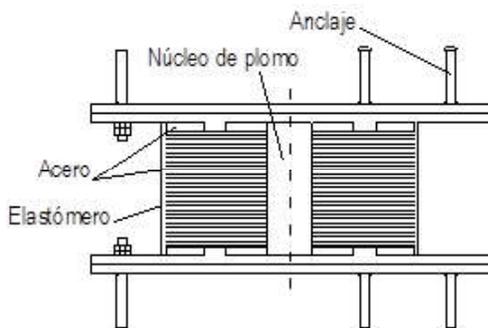
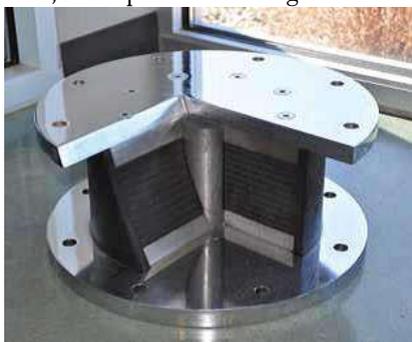


Figura 15. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

La relación fuerza-desplazamiento puede modelarse mediante el modelo histerético indicado en la Figura 16.

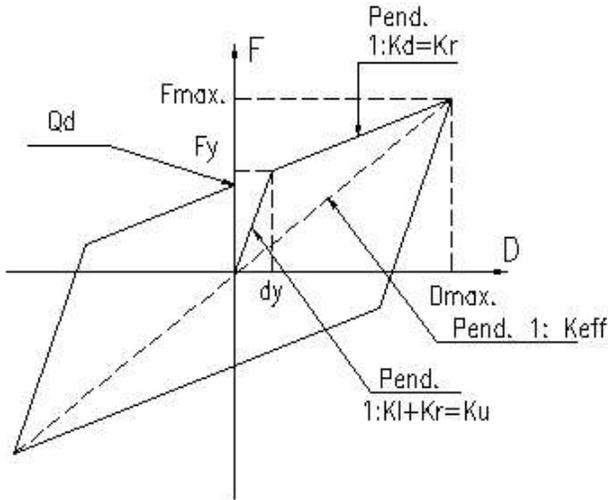


Figura 16. Constitutiva no lineal del aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).

Los aisladores pueden ser identificados a través de distintos parámetros mecánicos, uno de ellos es la rigidez horizontal la cual puede estimarse con la siguiente expresión.

$$K_H = \frac{G A}{H_r} \tag{31}$$

Donde: G : módulo de corte transversal de la goma.
 A : área del aislador.
 H_r : altura total de goma.

El periodo del sistema aislado está en función de la rigidez lateral total del conjunto y puede estimarse con la expresión (32). La rigidez vertical del aislador puede determinarse con la ecuación (33).

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_H g}} \tag{32}$$

Donde: W : peso de la estructura.
 K_H : Rigidez horizontal total del sistema de aislamiento.

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad (33)$$

Donde, E_c : módulo de elasticidad de la goma, modificado por un factor de forma del aislador (Kelly, 1993, 1996) y t_r : espesor de una capa de goma.

Con el valor de la rigidez vertical del aislador puede estimarse las tensiones normales (σ_c) y deformaciones (ε_c) del mismo las cuales deben ser inferiores a los límites fijados por los reglamentos de aplicación. Las tensiones en las placas de acero se verifican con la expresión siguiente:

$$\sigma_s = 2 \frac{t_r}{t_s} \sigma_c \quad (34)$$

Donde, t_s : espesor de la placa de acero.

Es necesario controlar la deformación debida a compresión, corte y flexión de tal manera que no supere los valores admisibles dados por los reglamentos de aplicación:

$$(\gamma_c)_o + (\gamma_s)_o + (\gamma_b)_o \leq f \varepsilon_u \quad (35)$$

Donde :
 $(\gamma_c)_o$: Distorsión angular máxima asociada a la compresión.
 $(\gamma_s)_o$: Distorsión angular máxima asociada al corte.
 $(\gamma_b)_o$: Distorsión angular máxima asociada a la flexión.
 $f = 1/3$ Para estado de servicio.
 $f = 1/2$ Para el terremoto de diseño.
 $f = 9/10$ Para el terremoto máximo esperado.

Para las deformaciones últimas se aceptan valores comprendidos entre 0.50 – 0.60. Para controlar la esbeltez del aislador se realizan dos comprobaciones. La primera es la verificación al vuelco del aislador que se efectúa a través de un desplazamiento lateral (Δ_{ro}):

$$\Delta_{ro} = \frac{P * D}{(2 K_H H) + P} \quad (36)$$

Donde: P : Carga normal sobre el aislador.
 D : Diámetro del aislador.
 H : Altura del aislador.

Los valores de (Δ_{ro}) deben ser inferiores a los límites fijados por los reglamentos de aplicación. La segunda verificación está relacionada con el pandeo del aislador que se realiza a través de una carga normal crítica (P_{cr}).

$$P_{cr} = \frac{R}{2} \left[\left(\sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{R}} \right) - 1 \right] \quad (37)$$

Donde: R : Rigidez lateral unitaria del aislador.
 P_E : Carga euleriana del aislador

La ecuación 37 no contempla la reducción de la capacidad debido a las grandes deformaciones del aislador en compresión. Este efecto se considera mediante la reducción de la carga crítica y para ello se la multiplica por un factor que tiene en cuenta el área efectiva (A_{eff}) en compresión y el área total de la sección del aislador (A), ecuación 38.

$$P_{cr(eff)} = P_{cr} \frac{A_{eff}}{A} \quad (38)$$

La verificación queda satisfecha cuando la relación entre el ($P_{cr(eff)}$) y la carga normal N que actúa sobre el aislador es mayor que un coeficiente de seguridad definido por el reglamento de aplicación.

A. 3. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

Los HDRB son aisladores elastoméricos cuyas láminas de elastómeros son fabricados adicionando elementos como carbón, aceites y resinas, con el fin de aumentar el amortiguamiento de la goma hasta niveles cercanos al 10-15%. Los aisladores tipo HDRB presentan mayor sensibilidad a cambios de temperatura y frecuencia que los aisladores tipo LDRB y LRB. A su vez, los aisladores HDRB presentan una mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, que generalmente se estabiliza luego del tercer ciclo de carga. Estos dispositivos, al igual que los dispositivos tipo LRB, combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento, con la característica de ser, relativamente, de fácil fabricación.

El desarrollo de la goma con alto amortiguamiento fue obtenido en 1982 por *Malaysian Rubber Producers Research Association (MRPRA)* y dicha característica permite diseñar sistemas de aislamiento sin la adición de mecanismos que provean un amortiguamiento adicional. El amortiguamiento puede ser incrementado a valores comprendidos entre un 10 y un 15% con el 100% del esfuerzo de corte (Naeim et al., 1999).

El amortiguamiento que provee el aislador de goma de alto amortiguamiento no es viscoso ni tampoco histerético, su respuesta se encuentra entre ambos. Para un amortiguamiento viscoso lineal la disipación de energía es función del cuadrado del desplazamiento, mientras que para amortiguamiento histerético tiende a ser lineal con el desplazamiento.

B. Aisladores deslizantes

Los aisladores deslizantes o también llamados deslizadores friccionales utilizan una superficie de deslizamiento, típicamente de acero inoxidable, sobre la que desliza una placa de acero revestida de Politetra Fluoro Etileno (PTFE) más conocido como teflón, sobre la que se soporta la estructura. La superficie de deslizamiento permite el movimiento horizontal de la estructura de manera independiente del suelo. Este sistema de aislación sísmica permite disipar energía por medio de las fuerzas de rozamiento que se generan durante un terremoto. El coeficiente de fricción del aislador depende de variables tales como la temperatura de trabajo, la presión de contacto, la velocidad de movimiento, el estado de las superficies de contacto (limpieza, rugosidad, etc.) y el envejecimiento. Los aisladores deslizantes planos generalmente deben ser acompañados por mecanismos o sistemas restitutivos (típicamente aisladores elastoméricos con o sin núcleo de plomo) que restituyan la estructura a su posición original luego del terremoto. Adicionalmente, estos dispositivos requieren de mayor mantenimiento y cuidado, ya que cualquier modificación en las superficies deslizantes puede modificar los parámetros de diseño de los dispositivos.

La empresa *Earthquake Protection Systems (EPS)* fue quien patentó el aislador FPS. La misma le ha dado un gran impulso y se han instalado una importante cantidad de dispositivos a nivel mundial. El desarrollo tecnológico y el buen resultado obtenido con estos dispositivos han permitido contar actualmente con tres generaciones de aisladores friccionales. A los de primera generación se los conoce como de simple péndulo de fricción con una única superficie de deslizamiento, los de segunda cuentan con doble superficie de deslizamiento y a los de tercera generación, se los identifica como de triple péndulo de fricción con cuatro superficies de deslizamiento. Los aisladores friccionales poseen algunas ventajas y desventajas con relación a los aisladores elastoméricos.

Entre las principales ventajas pueden citarse: I) menores alturas; II) la separación entre el sistema de transmisión de carga vertical y el sistema de resistencia lateral (restitución); III) posibilidad de limitar el nivel de corte basal máximo de la estructura a un valor preciso; IV) simplicidad del mecanismo de disipación y bajo costo; V) los aisladores friccionales son más adecuados para estructuras livianas, VI) insensible al contenido de frecuencias del input; VII) se logra una frecuencia fundamental exacta; VIII) es independiente de la masa; XIX) Fuerza friccional proporcional al peso y eso minimiza los efectos de torsión (en el sistema de aislación, no en la superestructura).

Entre las desventajas se pueden mencionar: a) el control de las fuerzas normales en la interface de aislación; b) necesidad de proveer un mecanismo paralelo de restitución; c) mayor incertidumbre en la variación del coeficiente de fricción (μ), con el envejecimiento, abrasión y uso; d) incertidumbre en las propiedades de presión y velocidad; e) posibilidad de levantamiento.

Dentro de los aisladores friccionales existen distintos dispositivos, de los cuales los más importantes son:

B. 1. Aisladores friccionales

Los aisladores friccionales son los dispositivos más simples. Consisten básicamente en dos superficies, una adherida a la estructura y la otra a la fundación; poseen un bajo coeficiente de rozamiento, situación que permite los movimientos horizontales y también el hecho de

resistir las cargas verticales.

Por lo general, las superficies deslizantes son de acero inoxidable pulidas al espejo y de un material polimérico de baja fricción. A fin de prevenir deformaciones residuales luego de un evento sísmico, se debe proveer de sistemas restitutivos (típicamente aisladores elastoméricos o con núcleo de plomo) que restituyan la estructura a su posición original.

La Figura 17 muestra esquemáticamente un apoyo deslizante plano.

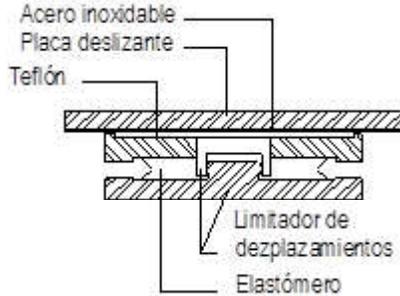


Figura 17. Esquema de un dispositivo aislador sísmico de base del tipo deslizante plano.

El comportamiento y la respuesta estructural de estos sistemas han sido estudiados por distintos autores (Constantinou et al., 1984, Bozzo et al., 1990, Tsopelas et al., 1994). El principio de los aisladores friccionales se basa en la ley de fricción de Coulomb dada por la ecuación (39).

$$F_f = \mu N_n \quad (39)$$

Donde:

N_n = Fuerza normal en la interfase de aislación.

$\mu = \tan(\varphi)$, coeficiente de fricción.

φ = Ángulo de roce medido entre la normal a la superficie y la dirección de la reacción sobre el cono de fricción.

En la interfase es necesario un material con una superficie muy pulida, para ello se utiliza el acero inoxidable. Por otro lado es necesario contar con un material de bajo coeficiente de fricción, entre ellos el teflón (polytetrafluoroetileno PTFE) presenta dicha propiedad debido a que se pueden lograr coeficientes entre $0.02 < \mu < 0.12$, valores menores que los que presentan otros materiales (De la Llera et al., 1998).

En la interfase teflón-acero, el coeficiente de fricción depende de la velocidad de deformación y de la presión de contacto. Dicho coeficiente aumenta con la velocidad y tiende a estabilizarse para valores de aproximadamente 10 cm/seg. (De la Llera et al., 1998)

Para estos dispositivos la disipación de energía se realiza a través del amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco (31), el cual es proporcional al coeficiente cinético de fricción, a la carga normal y a la amplitud del movimiento. El coeficiente de fricción es función de la naturaleza de la superficie de deslizamiento, velocidad relativa y de la presión de contacto, esto puede variar con el tiempo. Investigaciones realizadas sobre dicho coeficiente de fricción (Mokha et

al., 1988; Constantinou et al., 1990) concluyeron que la variación del coeficiente puede modelarse de acuerdo a la ecuación (40).

$$\mu_{(t)} = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-b_f |\dot{x}_b|) \quad (40)$$

Donde:

μ_{\max} = Coeficiente de fricción a velocidades altas.

μ_{\min} = Coeficiente de fricción a velocidades cercanas a cero.

b_f = Parámetro que controla la variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad.

\dot{x}_b = Velocidad de deslizamiento.

Los dispositivos son fabricados con coeficientes de fricción que varían entre 0.10 y 0.30 y el mismo se representa como una función monótonamente creciente con la velocidad de deslizamiento (Bozzo et al., 2000).

B. 2. Péndulo Simple de friccionales (FPS, Friction Pendulum System)

El aislador de simple péndulo de fricción cuenta con un deslizador articulado ubicado sobre una superficie cóncava. Los FPS, a diferencia de los apoyos deslizantes planos, cuentan con la característica y ventaja de ser autocentrantes. Luego de un movimiento sísmico, la estructura regresa a su posición inicial gracias a la geometría de la superficie y a la fuerza inducida por la gravedad. En la Figura 18 se presenta el esquema de una aislador friccional de simple péndulo, al cual se le han asignado dimensiones geométricas para poder expresar las características geométricas de los mismos.

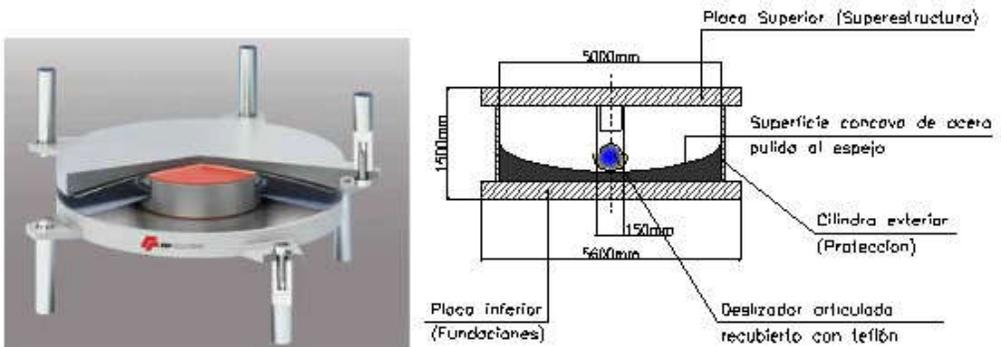


Figura 18. Esquema genérico y fotografía aislador friccional de simple péndulo (FPS).

El dispositivo emplea el peso propio de la estructura para recentrar el edificio, minimizando los desplazamientos finales permanentes (Mokha et al., 1990). Los materiales que se utilizan son los mismos que los del aislador anterior (acero inoxidable y PTFE), la superficie esférica es de acero inoxidable y el patín de teflón de alta resistencia. Este último se articula de manera que se adapte adecuadamente a la superficie esférica una vez desplazado.

Condiciones de equilibrio indican que la fuerza (F) actuando sobre el patín cuando el mismo se desliza puede ser determinada por la ecuación (41) (De la Llera et al., 1998).

$$F = \left(\frac{W}{R_e} \right) \delta + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{\delta}) \quad (41)$$

Donde: W = Fuerza normal sobre el patín del aislador.

R_e = Radio de la superficie esférica.

m = Coeficiente de fricción.

d = Desplazamiento del patín del aislador.

El período secante del aislador pendular friccional se aproxima al período de un péndulo de radio R_e , oscilando en torno a un punto fijo.

$$T_{\text{sec}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_e \delta o}{g(\delta o + \mu R_e)}} \rightarrow \left(2\pi \sqrt{\frac{R_e}{g}} \right)_{\delta o \rightarrow \infty} \quad (42)$$

Donde: δo = Deformación máxima.

Por lo tanto si se dan valores a R_e es posible determinar en forma simple valores del periodo secante del aislador. Las ecuaciones propuestas son suficientes a los fines prácticos de diseño de los aisladores. El aislador de péndulo de fricción tiene una ley constitutiva con valores de rigideces estables en los distintos pasos histeréticos. En la Figura (19), se muestran los resultados de un ensayo realizado sobre un aislador pendular friccional (De la Llera et al., 1998).

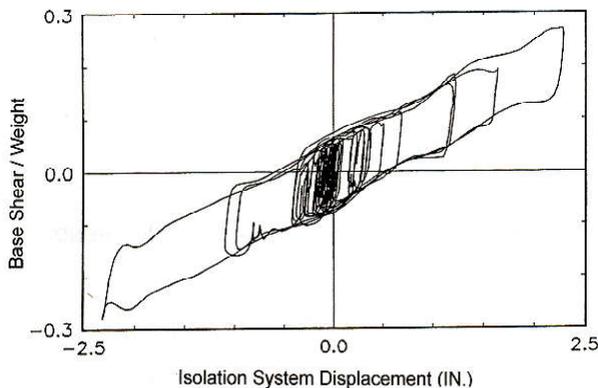


Figura 19. Ensayo de un aislador pendular friccional realizado en mesa vibradora.

Por lo tanto la ley constitutiva que se utiliza para modelar el aislador friccional de simple péndulo es la que muestra la Figura 20.

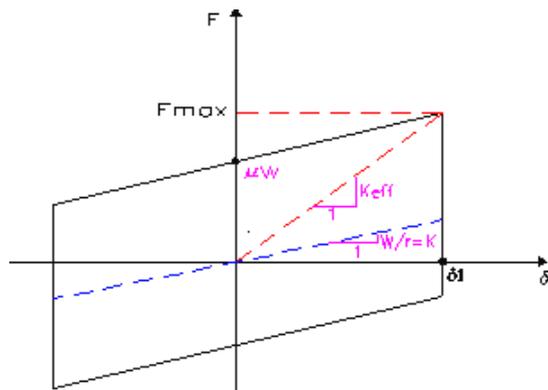


Figura 20. Constitutiva de un aislador friccional de simple péndulo.

Debido al movimiento aleatorio de un terremoto, el deslizador se mueve sobre la superficie cóncava en las dos direcciones siguiendo también movimientos aleatorios, sin embargo el planteo matemático del problema puede realizarse descomponiendo el movimiento en las direcciones principales. En rigor, el deslizador no se desplaza sobre una línea cóncava sino sobre una superficie que tiene la forma de un casquete esférico invertido (Figura 21).

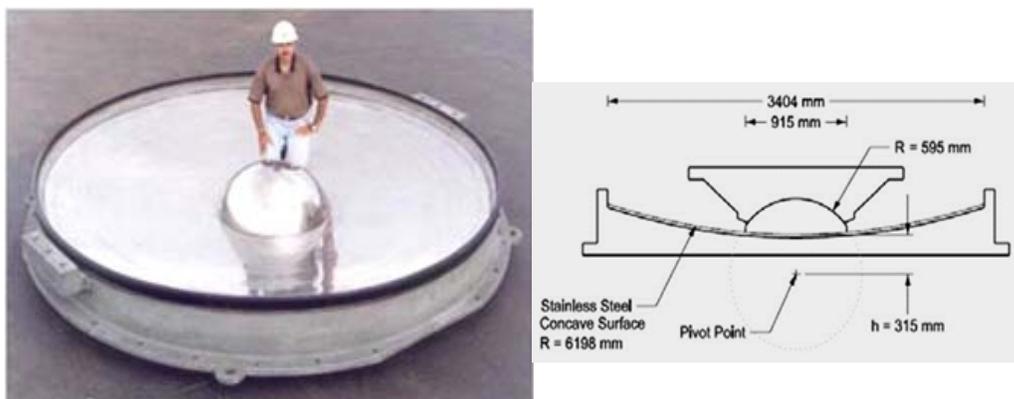


Figura 21. Deslizador y superficie cóncava de deslizamiento.

A. 4. Aisladores de triple péndulo de fricción (FP)

El aislador de triple péndulo de fricción posee, en relación al de simple péndulo de fricción, importantes diferencias con relación a la rigidez, amortiguamiento y amplitud de desplazamientos. La constitutiva de fuerza versus desplazamientos es compleja y muestra distintos puntos de transición que dependen de las propiedades geométricas y friccionales de los aisladores. En la Figura 22 se muestra la geometría de un aislador de triple péndulo de fricción (FP). (Fenz et al., 2008).

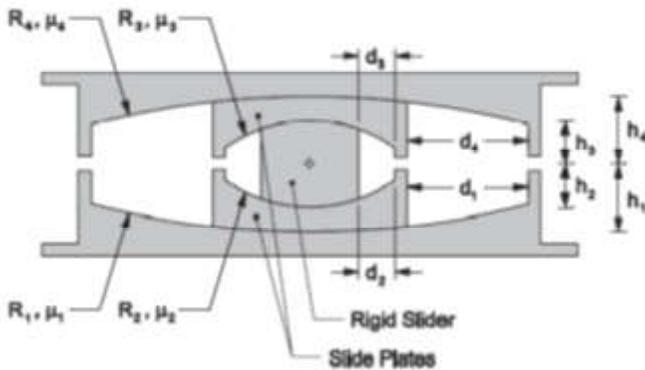


Figura 22. Geometría y características generales de un aislador de triple péndulo de fricción.

La respuesta de los aisladores de triple péndulo de fricción es función de los siguientes parámetros: radios R_1, R_2, R_3 y R_4 (normalmente $R_1=R_4$ y $R_2=R_3$); alturas h_1, h_2, h_3 y h_4 (normalmente $h_1=h_4$ y $h_2=h_3$); distancias que definen la capacidad de desplazamientos d_1, d_2, d_3 y d_4 (normalmente $d_2=d_3$ y $d_1=d_4$) y de los coeficientes de fricción m_1, m_2, m_3 y m_4 (normalmente $m_2 = m_3$). La capacidad de desplazamiento en cada interfase de deslizamiento puede determinarse con la expresión siguiente:

$$d_i^* = \frac{R_{eff\ i}}{R_i} d_i; \quad i = 1 \dots 4 \quad (43)$$

Donde $R_{eff\ i}$, es el radio efectivo para la superficie «i», el cual se puede determinar con la expresión siguiente:

$$R_{eff\ i} = R_i - h_i \quad i = 1 \dots 4 \quad (44)$$

La relación fuerza lateral versus desplazamientos del aislador de triple péndulo de fricción se muestra en la Figura 23. Ella muestra cinco ciclos («loops») diferentes que definen, a su vez, cinco regímenes de desplazamientos diferentes. Los aisladores de triple péndulo de fricción son normalmente diseñados para trabajar entre el régimen I y IV. El régimen V, se reserva como parámetro para restringir el desplazamiento del dispositivo. En régimen V el dispositivo consu-

me la capacidad de desplazamiento d_1 y d_4 , deslizando solo las superficies 2 y 3 (Figura 22). (Fenz et al., 2008).

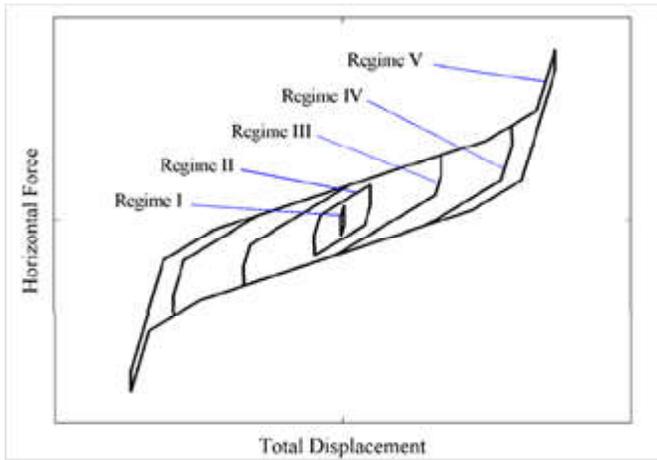


Figura 23. Relación Fuerza lateral versus desplazamientos de un aislador de triple péndulo de fricción.

La constitutiva, fuerza versus desplazamiento, del aislador de triple péndulo de fricción se muestra en la Figura 24. La misma representa el caso particular que citan el grupo de igualdades (45). (Fenz et al., 2008).

$$R_{eff1} = R_{eff4} ; R_{eff2} = R_{eff3} ; d_1^* = d_4^* ; d_2^* = d_3^* ; \mu_1 = \mu_4 ; \mu_2 = \mu_3 \quad (45)$$

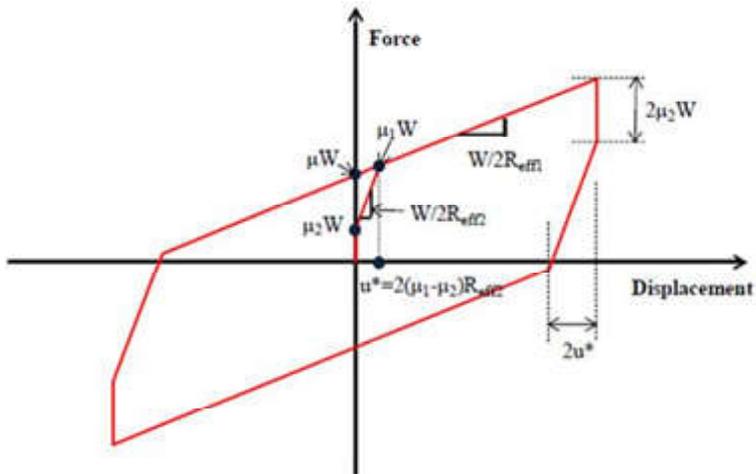


Figura 24. Relación Fuerza-Desplazamiento del aislador de triple péndulo de fricción.

La relación Fuerza-Desplazamiento que describe la Figura 24 puede determinarse con la expresión siguiente:

$$F = \frac{W}{2R_{eff1}}u + \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right] W \quad (46)$$

La relación dada por la ecuación (38) es válida hasta que la fuerza lateral y el desplazamiento alcanzan los valores dados por las ecuaciones siguientes:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}}d_1^* + F_{f1} \quad (47)$$

$$u = u^* + 2d_1^* = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + 2d_1^* \quad (48)$$

$$u^* = u^{**} = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} \quad (49)$$

La fuerza para desplazamiento cero se determina con la expresión (42):

$$\mu W = \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right] W \quad (50)$$

C. Sistemas de resortes metálicos helicoidales y amortiguadores viscosos

Estos dispositivos fueron originalmente desarrollados para aplicarse en máquinas de pequeño porte, luego se extendió a fundaciones de máquinas pesadas e instalaciones industriales de importancia, como ejemplo una platea de fundación de turbogeneradores (Stuardi et al., 2005). Sin embargo en los últimos años se han realizado estudios sobre la respuesta de estructuras aisladas utilizando dichos sistemas cuando las estructuras se encuentran sujetas a la acción de los terremotos. Un claro ejemplo es el edificio de la Residencia Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, el cual fue construido con este sistema de aislamiento. Desde su inauguración ha sido permanentemente monitoreado y su comportamiento frente acciones sísmicas ha sido exitoso. (Tornello et al., 2003, 2004, 2005).

Posee la ventaja de que el comportamiento es conocido y controlado, es adecuado a las altas temperaturas (por lo tanto para su fabricación se utilizan determinadas aleaciones), no presenta fluencia ni tampoco desplazamiento residuales.

Comparativamente con otros sistemas es de menor costo, presenta la desventaja de que el resorte solo, posee bajo amortiguamiento (cerca del 2%) por lo tanto es necesario utilizarlo con otros dispositivos que permitan aumentar dichos valores. Para soportar elevadas cargas deben utilizarse paquetes de resortes debido a que la capacidad de carga de un único resorte, relacionado con las dimensiones y diámetro del espiral tecnológicamente viable de fabricación, es baja.

Los aisladores elastoméricos o friccionales, en sus distintos modelos, son habitualmente

utilizados para suministrar aislamiento horizontal. Los sistemas basados en resortes metálicos han sido utilizados en viviendas para proveer aislamiento en las tres direcciones (Naeim et al., 1999).

Los dispositivos GCS (GERB Control System®, quien posee las patentes de los dispositivos) fueron originalmente diseñados, para controlar las vibraciones que generaban las turbinas en plantas hidroeléctricas. El sistema está conformado por paquetes de resortes con baja rigidez en sentido horizontal y vertical. Para aumentar el amortiguamiento del sistema de aislamiento se instalan junto con amortiguadores viscosos (Visco® - Figura 25)

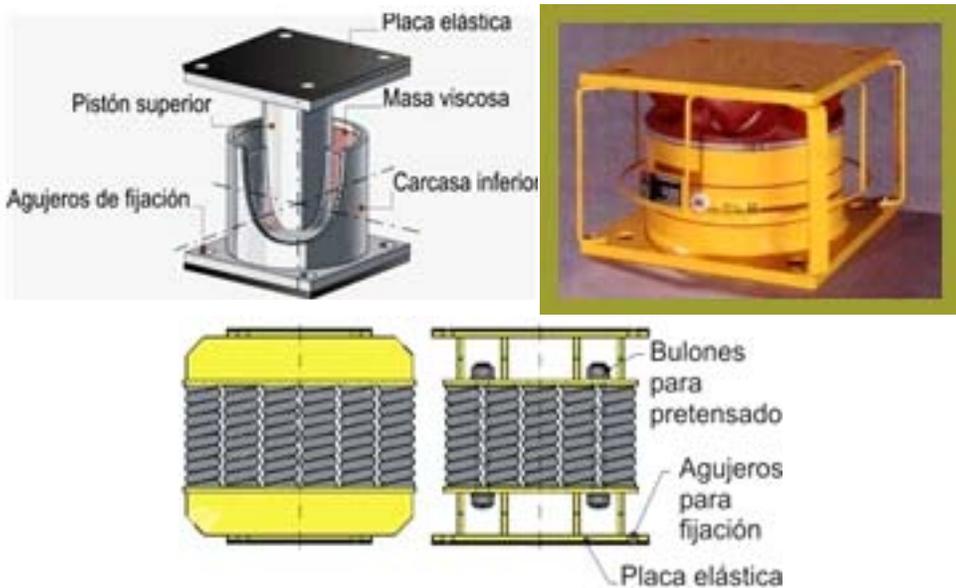


Figura 25. Paquete de resortes metálicos GERB y Amortiguadores viscoelásticos GERB (Visco®).

El amortiguador viscoso (Figura 25) está compuesto por una carcasa inferior que contiene una masa viscosa. El pistón de la carcasa superior penetra en una masa viscosa y genera una fuerza, también viscosa, en las tres direcciones ortogonales. Un manguito de protección cierra herméticamente ambas carcasas para evitar que ingresen elementos extraños de tal manera de impedir la contaminación de la masa viscosa.

El sistema presenta un fuerte acoplamiento entre el movimiento horizontal y el pendular debido a que el centro de gravedad de la estructura aislada se encuentra por encima del centro de rigidez del mismo (Figura 26), por lo tanto el sistema es práctico en situaciones donde el centro de gravedad y el centro de rigidez se encuentran en el mismo nivel (caso que se presenta con mucha frecuencia en el reactor de una planta nuclear (Farzad et al., 1999).

La rigidez vertical del resorte puede evaluarse con la ecuación (51) mientras que la lateral se encuentra influenciada por un efecto combinado de la flexión y torsión y puede ser evaluado con la ecuación (52).

$$k_v = \frac{G d_e^4}{8 n_e D^3} \quad (51)$$

$$k_l = \frac{1.13 * 10^6 d_e^4}{n_e D (0.204 h_s^2 + 0.256 D^2)} [N * m] \quad (52)$$

Donde: G = Módulo de corte del material del resorte.
 d_e = Diámetro de la espira que conforma el resorte.
 n_e = Número de espiras activas.
 h_s = Altura libre del resorte.

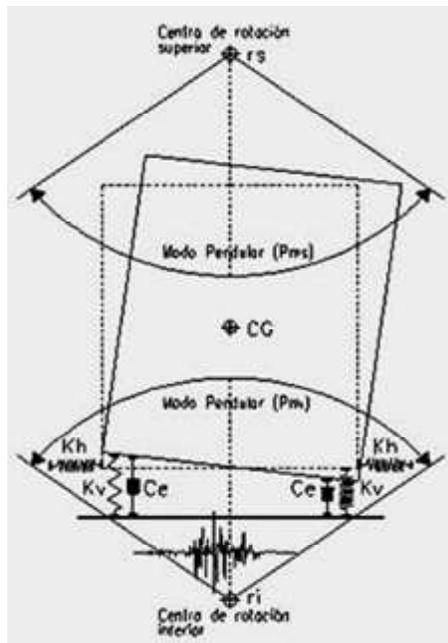


Figura 26. Esquema general de los polos de rotación del sistema de aislamiento GERB para los modos pendulares

El sistema (aisladores de resortes helicoidales más amortiguador viscoso) instalado en la Residencia de Estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la UTN, presentan como característica una rigidez lineal, tanto horizontal como vertical y un amortiguamiento cuyo comportamiento se aproxima al lineal viscoso (Figura 27) sin embargo en otros casos la variación es no lineal con la velocidad situación que puede ser beneficiosa cuando los niveles de aceleración del terremoto son elevadas.

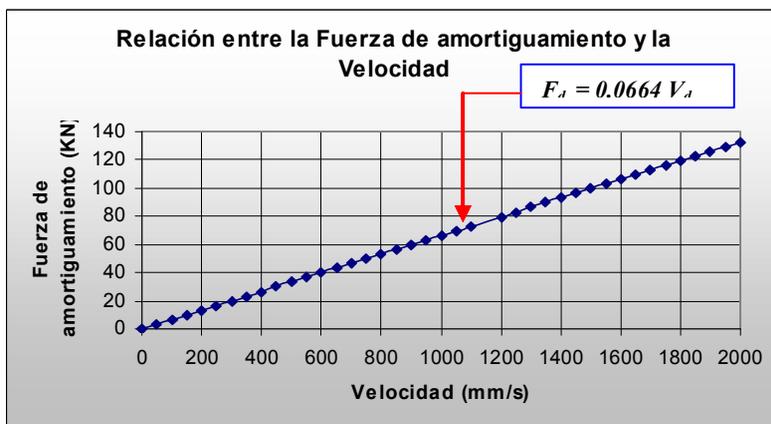


Figura 27. Relación lineal entre la fuerza de amortiguamiento y la velocidad.

C. 1. Marco teórico para evaluar las respuestas de estructuras aisladas con dispositivos GCS

Inicialmente y con el objeto de evaluar respuestas de estructuras aisladas con dispositivos GCS, puede utilizarse un modelo simplificado que permite determinar las respuestas en el tiempo cuando actúan las tres componentes sísmicas del terremoto (Aguiar y Tornello, 2009). El modelo considera que la superestructura se desplaza como cuerpo rígido ante la acción de un sismo sin embargo, debido a la presencia de los resortes, los desplazamientos verticales en los extremos del edificio serán de signos contrarios debido al efecto pendular de la respuesta (Tornello y Sarrazin, 2007). Es decir, mientras un extremo de la estructura aislada asciende, el otro desciende, la diferencia de desplazamientos verticales pone de manifiesto el mecanismo de disipación de energía.

Para el análisis de la respuesta sísmica el método numérico considera concentrada la masa en la posición donde se emplazan los resortes helicoidales de acero y el amortiguador viscoso. En cada masa del sistema de aislamiento se consideran tres grados de libertad, dos desplazamientos horizontales y un desplazamiento vertical, como se muestra en la Figura 28. El problema corresponde a una estructura con cuatro dispositivos de control pasivo nótese, por lo tanto, que primero se han enumerado los grados de libertad correspondientes a los desplazamientos horizontales en sentido «X», luego los desplazamientos horizontales en sentido «Y» y finalmente los grados de libertad verticales. Cada dispositivo de control tiene tres rigideces según las direcciones X, Y, Z; como se aprecia a la izquierda de la Figura 29 y tiene tres factores de amortiguamiento (amortiguador viscoso) dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical como se observa a la derecha de la Figura 18.

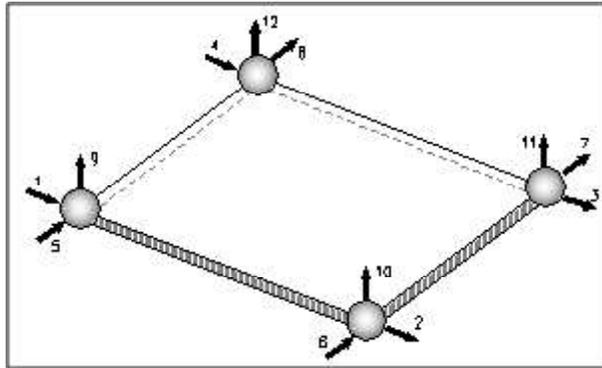


Figura 28. Grados de libertad del sistema de aislamiento

Las matrices de rigidez $K^{(b)}$, y de masa $M^{(b)}$, del modelo propuesto quedan definidas a través de las matrices 53 y 54.

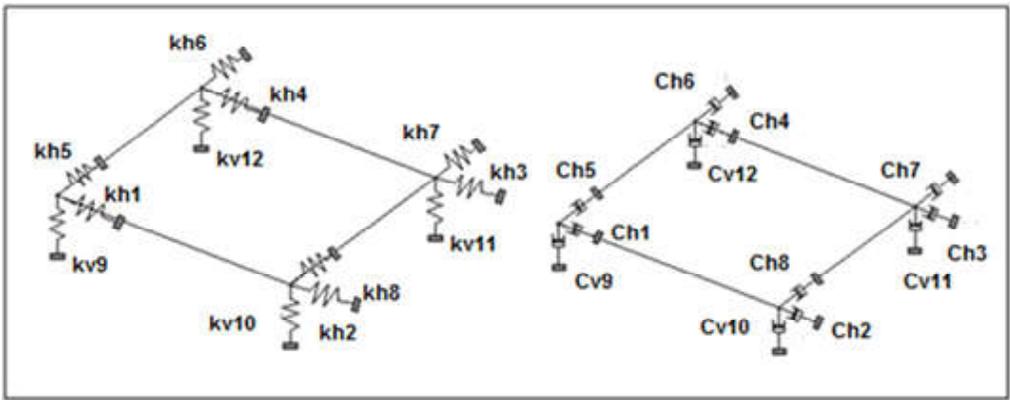


Figura 29. Rigidez y amortiguamiento en la posición de los dispositivos GCS

$$K^{(b)} = \begin{bmatrix} k_{hx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{hy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{vz} \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$M^{(b)} = \begin{bmatrix} m^{(t)} & 0 & 0 \\ 0 & m^{(t)} & 0 \\ 0 & 0 & m^{(t)} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Donde k_{hx} , k_{hy} , k_{yz} son submatrices diagonales, cuyos elementos son las rigideces de los aisladores de resortes en sentido; horizontal (x), horizontal (y), y vertical (z), respectivamente. En la expresión 54, $m^{(t)}$ es una submatriz diagonal, compuesta por cada una de las masas discretas. (Aguar, 2007).

Con relación al modelo de la Figura 29 y en concordancia con un sistema de aislamiento compuesto por cuatro resortes de acero y cuatro amortiguadores viscosos, k_{hx} es una submatriz diagonal de cuatro por cuatro, cuyos términos de la diagonal son, k_{h1} , k_{h2} , k_{h3} , k_{h4} . Los elementos asociados a la k_{hy} son k_{h5} , k_{h6} , k_{h7} , k_{h8} y los correspondientes a K_{vz} son k_{v9} , k_{v10} , k_{v11} , k_{v12} .

Por otro lado, los elementos de la diagonal de la submatriz $m^{(t)}$ son, m_p , m_2 , m_3 , m_4 . Las masas discretas m_i se obtienen en función del peso total de la superestructura, de la losa por encima de los dispositivos de aislamiento y el peso propio de cada dispositivo de aislamiento.

$$C^{(b)} = M^{(b)} \Phi \hat{C}^{(b)} \Phi^t M^{(b)} \quad (55)$$

La matriz de amortiguamiento $C^{(b)}$ se obtiene en función de la matriz de masas $M^{(b)}$ de los modos de vibración, de la matriz modal y del amortiguamiento del dispositivo viscoso (Expresión 55).

Donde $\hat{C}^{(b)}$ es una matriz diagonal compuesta por las submatrices que definen el amortiguamiento del dispositivo viscoso (Expresión 56).

$$\hat{C}^{(b)} = \begin{bmatrix} \hat{C}_{hx} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{C}_{hy} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{C}_{vz} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Para el modelo de la Figura 29, los elementos de la diagonal de \hat{C}_{hx} son C_{h1} , C_{h2} , C_{h3} , C_{h4} . En función del factor de amortiguamiento en sentido horizontal x_h , se definen los elementos de la diagonal de \hat{C}_{hx} con $2\xi_{hi} \omega_i m_i$ para «i» de 1 a 4. Siendo ξ_{hi} el factor de amortiguamiento en sentido (x) asociado al primer modo de vibración; m_i es la masa discreta *i*; ω_i es la frecuencia de vibración para el modo *i*; los valores de las submatrices \hat{C}_{hy} , \hat{C}_{vz} resultan en todos sus términos similares a los precedentes, es decir, el subíndice *i*, es el modo de vibración para el caso de la frecuencia natural ω_y para el factor de amortiguamiento ξ . El subíndice *i*, también indica la masa discreta.

Para la dirección (y) se trabaja con el factor de amortiguamiento en sentido (y). Para la dirección Z, con el correspondiente factor de amortiguamiento vertical. Cada amortiguador viscoso tiene tres factores de amortiguamiento, dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical. El modelo presentado considera que la superestructura se mueve como cuerpo rígido y la respuesta de la misma se determina resolviendo la ecuación 57.

$$M^{(b)} \ddot{q}^{(b)} + C^{(b)} \dot{q}^{(b)} + K^{(b)} q^{(b)} = -M^{(b)} J \ddot{U}_g \quad (57)$$

Donde $q^{(b)}$, $\dot{q}^{(b)}$, $\ddot{q}^{(b)}$ son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema de aislamiento. Se hace notar que, primero se enumeran todas las coordenadas en sentido (x), luego en sentido (y), y finalmente en (z) (Figura 29). En estas condiciones y cuando solo actúa sismo en sentido (x), el vector $J' = [1 \ 0 \ 0]$; para sismo en sentido (y) el vector y para sismo en sentido (z), $J' = [0 \ 0 \ 1]$. Donde I es el vector unitario y 0 , un vector compuesto por ceros. El orden de estos vectores I y 0 es igual al número de masas discretas. Con esta consideración la aceleración del suelo \ddot{U}_g puede ser \ddot{U}_{gx} para sismo en sentido (x) \ddot{U}_{gy} ; para sismo en sentido (y); \ddot{U}_{gz} para sismo en sentido (z).

C.2. Respuestas en la superestructura aislada con dispositivos GCS

Se plantea un modelo matemático para un edificio de planta rectangular y de tres niveles. El modelo matemático de análisis admite que las losas de la superestructura son rígidas en el plano horizontal razón por la cual se considera un grado de libertad vertical en cada uno de los nudos de la superestructura. Por otra parte, en función de la hipótesis asumida, se puede admitir que el piso experimenta el mismo desplazamiento horizontal (Aguar y Tornello, 2009). En la Figura 19 se indican los grados de libertad considerados; nótese que, primero se enumeran los desplazamientos horizontales de piso y posteriormente los desplazamientos verticales.

La estructura que se plantea como ejemplo tiene 27 grados de libertad (desplazamientos), 3 en sentido horizontal (x) y 24 en sentido vertical. Los desplazamientos se agrupan en un vector u . El algoritmo permite el análisis sísmico de la estructura ante la acción de dos componentes horizontales y una vertical. Se define al vector transpuesto $u' = [u_x \ u_z]$ donde u_x es el vector que contiene a los desplazamientos de piso en sentido horizontal; u_z el vector que contiene a los desplazamientos de cada nudo en sentido vertical.

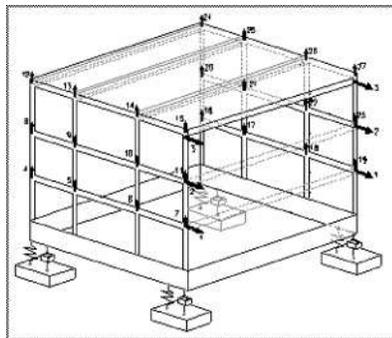


Figura 30. Grados de libertad considerados en la superestructura

Para los dispositivos GCS se han considerado tres grados de libertad en cada dispositivo de control (Figura 31). Debido a que la estructura se plantea con cuatro dispositivos GCS, uno en cada vértice del edificio, se tendrán 12 grados de libertad los cuales se los agrupa en un vector q . El vector transpuesto se define como q^T . Donde q_x es un vector compuesto por los desplazamientos en sentido (x), q_y , q_z , vectores formados por los desplazamientos de los dispositivos GCS en sentido (y), (z), respectivamente.

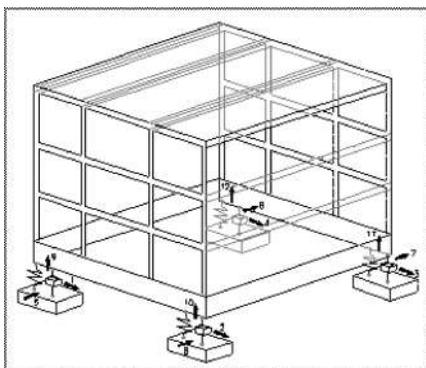


Figura 31. Grados de libertad de los dispositivos GCS

Las masas discretizadas de la superestructura se ubican en cada nudo de la misma (Figura 32). La numeración de las masas está en concordancia con la numeración de los grados de libertad mostrados en la Figura 30. Primero se enumeran las masas de todo un plano vertical desde el primer piso hasta el último piso y luego se continúa con el siguiente elemento. En la Figura 33 se indica la discretización de las masas del sistema de aislamiento. Cada una de estas masas se obtiene tomando en cuenta el peso de la losa ubicada por encima de los dispositivos de aislamiento y de los propios dispositivos de control GCS.

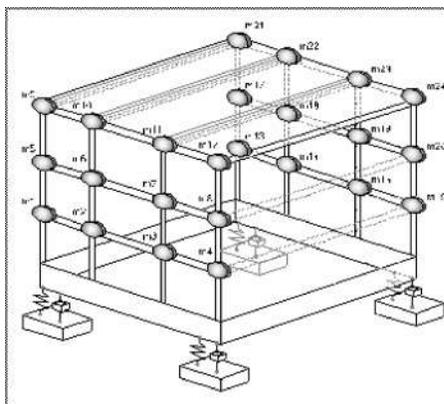


Figura 32. Discretización de las masas en la superestructura.

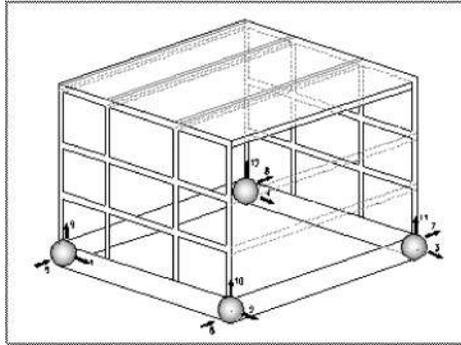


Figura 33. Discretización de las masas a nivel de dispositivos de aislamiento GCS

C. 3. Matrices de la superestructura

La matriz de rigidez $K^{(s)}$ de la superestructura se obtiene a partir de la matriz de rigidez lateral-vertical, K_{L-V} de cada uno de los planos verticales. Bajo la hipótesis de diafragma rígido se tendrá un desplazamiento horizontal por piso y dos grados de libertad en cada nudo, el desplazamiento vertical y la rotación.

Se determina la matriz de rigidez completa del plano vertical analizado con los grados de libertad indicados y luego se condensa para tener solo desplazamientos horizontales de piso y desplazamientos verticales en cada nudo. A dicha matriz se la conoce como matriz de rigidez lateral-vertical K_{L-V} (Aguiar *et al* 2008). Finalmente se determina la matriz de rigidez de la superestructura $K^{(s)}$ por ensamblaje directo.

La matriz de masas $M^{(s)}$ de la superestructura se halla evaluando la energía cinética de la estructura (Aguiar R., 2007). Para el modelo numérico que se analiza, la forma de la matriz diagonal $M^{(s)}$ es la indicada en la expresión (58)

$$M^{(s)} = \begin{bmatrix} m^{(st)} & \\ & m^{(sp)} \end{bmatrix} \quad (58)$$

Donde $m^{(st)}$ es una matriz diagonal compuesta por la masa total del piso 1, la masa total del piso 2, la masa total del piso n, $m^{(sp)}$, es una matriz diagonal compuesta por cada una de las masas discretas de la superestructura, desde la primera masa concentrada hasta la última masa considerada en el modelo. Encontradas las matrices de masa $M^{(s)}$ y de rigidez $K^{(s)}$ se determina la matriz modal $\Phi^{(s)}$ de la superestructura y se encuentra la matriz de amortiguamiento $C^{(s)}$ de la subestructura con la ecuación 59.

$$C^{(s)} = M^{(s)} \Phi^{(s)} \hat{C}^{(s)} \Phi^{(s)t} M^{(s)} \quad (59)$$

C.4. Matrices del sistema de aislamiento

Debido a las características de los aisladores de resortes, cada dispositivo de control posee tres rigideces según las direcciones (x), (y), (z). En correspondencia y debido a la particularidad de funcionamiento de los amortiguadores viscosos (Makris *et al*, 1991), cada dispositivo tendrá

tres factores de amortiguamiento, dos en sentido horizontal y uno en sentido vertical. El modelo ha sido indicado en la Figura 32.

La matriz de rigidez, $K^{(b)}$ y de masa $M^{(b)}$, se determinan con las expresiones (53) y (54). La matriz de amortiguamiento $C^{(b)}$ se evalúa con la expresión (55) y la matriz diagonal $\hat{C}^{(b)}$ que definen el amortiguamiento del amortiguador viscoso con la expresión (56).

C.5. Sistemas de ecuaciones diferenciales

El sistema de ecuaciones diferenciales tanto para los dispositivos de aislamiento como para la superestructura se expresan mediante las expresiones (60) y (61) (Aguiar et al. 2008).

$$M^{(b)} \ddot{q} + C^{(b)} \dot{q} + K^{(b)} q = -M^{(b)} r^{(b)} \ddot{u}_g - r^{(s)t} M^{(s)} \ddot{u} \quad (60)$$

$$M^{(s)} \ddot{u} + C^{(s)} \dot{u} + K^{(s)} u = -M^{(s)} r^{(s)} \left[\ddot{q} + r^{(b)} \ddot{u}_g \right] \quad (61)$$

Donde q , \dot{q} , \ddot{q} son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema de aislamiento; $r^{(b)}$ es un vector que relaciona los grados de libertad del sistema de aislamiento con la componente sísmica de movimiento del suelo; u , \dot{u} , \ddot{u} son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración de los grados de libertad de la superestructura; $r^{(s)}$ es similar a $r^{(b)}$ pero en la superestructura. Tanto el vector como $r^{(s)}$ están compuestos únicamente por 0 y 1. El 1 se ubica en las coordenadas que están relacionadas con el movimiento del suelo. Finalmente \ddot{u}_g es la componente sísmica del movimiento del suelo. Si se está analizando para sismo horizontal será \ddot{u}_{gx} , si es para sismo vertical será \ddot{u}_{gz} .

Se aclara que los grados de libertad de la superestructura son desplazamientos relativos con respecto al movimiento del sistema de aislamiento. Por este motivo es que la matriz de masas es diagonal. Para los dispositivos de aislamiento, la solución del sistema de ecuaciones diferenciales considera que \ddot{u}_g es constante. Es decir que aceleración proveniente de la superestructura no influye en el movimiento de los dispositivos de aislamiento (Kulkarni J. et al, 2002). Para encontrar la respuesta en el tiempo de los dispositivos GCS, se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales indicado en (62).

$$M^{(b)} \ddot{q} + C^{(b)} \dot{q} + K^{(b)} q = -M^{(b)} r^{(b)} \ddot{u}_g \quad (62)$$

Para encontrar la respuesta de la superestructura se trabaja con la ecuación diferencial completa (60) y (61).

Edificio aislado la FRM. UTN. Un caso de estudio

Instrumental y registros sísmicos

El edificio aislado forma parte del complejo de la residencia universitaria de la Facultad Regional Mendoza de la UTN (Tornello y Sarrazin, 2007). El complejo está compuesto por tres edificios de idénticas características arquitectónicas y estructurales destinados a dormitorios de los cuales, uno de ellos posee los dispositivos de protección. Dentro del mismo complejo fueron construidos locales destinados a comedores, recepción y sala de lectura.

Los edificios cuentan con instrumental sísmico para monitorear la respuesta frente a la ocurrencia de sismos. Los datos permiten comparar la respuesta del edificio de base fija con el edificio aislado, ambos se encuentran a escasos metros de distancia. La instrumentación instalada permitiría contar con información, en puntos estratégicos, del edificio aislado y simultáneamente del edificio con fundación tradicional.

Los instrumentos instalados son acelerómetros marca Kinematics, modelo Altus K2 con un sensor triaxial interno. El mismo actúa como central de adquisición de datos y es el receptor de otros nueve canales externos de registros de aceleración, por lo tanto el sistema instalado tiene capacidad para el registro simultáneo de aceleración, de doce canales. La instrumentación sísmica se completa con un acelerómetro triaxial Kinematics (SSA- 2) ubicado en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad Regional Mendoza, totalmente compatible con los instalados en los dos edificios que cumple las funciones de registro en campo libre. En la Figura 34 se observan los sensores externos y la central de adquisición de los registros sísmicos de los doce canales.

Desde la instalación del instrumental se han registrado más de cien eventos sísmicos en la zona de emplazamiento de los edificios de los cuales solo algunos fueron sensibles para la población en general. En la Tabla 2 se resumen, para cada evento, los picos de aceleración, velocidad y desplazamiento. En la Tabla 3 se indican los desplazamientos horizontales máximos en el techo del edificio aislado y para el edificio con base fija. En las últimas dos columnas se indican los desplazamientos horizontales y verticales a nivel de los dispositivos de aislamiento.



Figura 34. Instrumental sísmico instalado en el edificio aislado y en el de base fija

Tabla 2. Características de los sismos sensibles registrados

Fecha	PGA [% g]	PGV [cm/s]	PGD [cm]
09/09/2005	1,60	0,68	0,10
09/05/2006	1,10	0,50	0,05
05/08/2006	12,40	3,85	0,43
15/09/2007	5,50	1,32	0,06
16/10/2008	4,50	1,46	0,05
11/03/2009	1,32	0,52	0,07
08/05/2009	1,34	0,76	0,05
27/02/2010	1,66	7,69	4,36
06/07/2011	1,82	0,53	0,02
18/06/2012	9,07	3,70	0,24
12/09/2012	1,14	0,49	0,03
28/11/2012	0,97	0,61	0,07
15/11/2013	1,22	0,77	0,09
02/02/2015	0,80	1,16	0,46
07/05/2015	0,79	0,28	0,01

Tabla 3. Desplazamientos máximo registrados a nivel techo y de dispositivos GCS

Fecha	Base Fija: Desplazamiento horizontal en el techo (mm)	Edificio Aislado: Desplazamiento horizontal en el techo (mm)	Edificio Aislado: Desplazamiento horizontal a nivel GCS (mm)	Edificio Aislado: Desplazamiento vertical a nivel GCS (mm)
09/09/2005	1,220	1,610	1,190	0,500
09/05/2006	0,650	1,000	0,730	0,250
05/08/2006	5,620	9,410	5,160	2,260
15/09/2007	1,810	0,780	0,430	0,170
16/10/2008	1,170	0,900	0,570	0,370
11/03/2009	0,786	1,276	0,863	0,419
08/05/2009	1,534	1,490	1,362	0,843
27/02/2010	42,944	45,569	42,933	73,979
06/07/2011	0,529	0,390	0,231	0,133
18/06/2012	3,763	3,932	2,603	1,467
12/09/2012	0,622	0,441	0,296	0,173
28/11/2012	0,923	1,129	0,713	0,409
15/11/2013	1,059	1,271	0,970	0,251
02/02/2015	4,695	5,543	5,299	0,796
07/05/2015	0,259	0,193	0,136	0,087

A título de ejemplo en la Figura 35 se muestran los acelerogramas del sismo del 05-08-2006 para las componentes de máxima aceleración en, campo libre, inmediatamente por encima de los dispositivos de aislamiento, en el techo del edificio aislado y en el techo del edificio de base fija. En la Figura 36 se grafican los valores de aceleraciones registradas en los dos edificios, para algunos sismos sensibles ocurridos en la región. En todos los casos puede observarse que las aceleraciones del edificio de base fija (BF) son considerablemente mayores que las registradas en el edificio aislado (GCS).

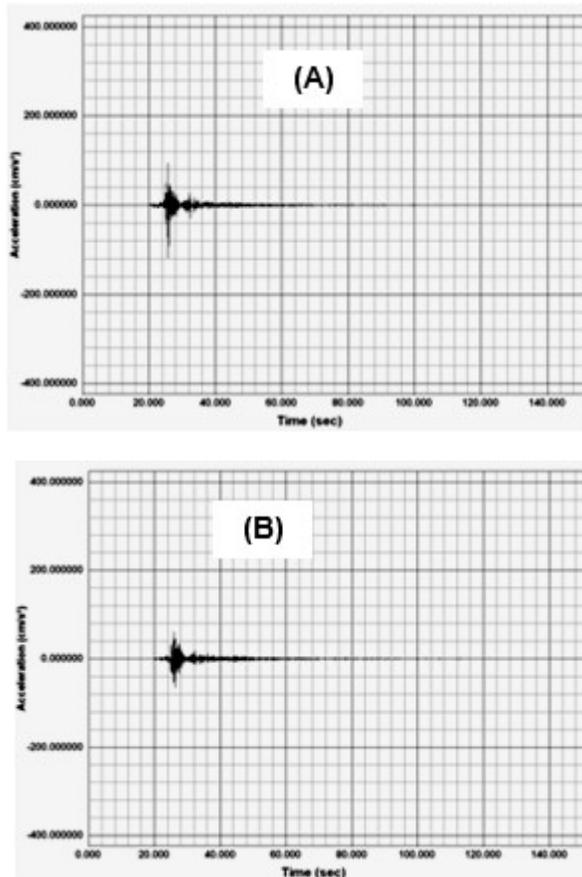


Figura 35. Acelerogramas del sismo del 05/08/2006. A) En campo libre; B) Por encima de los dispositivos;

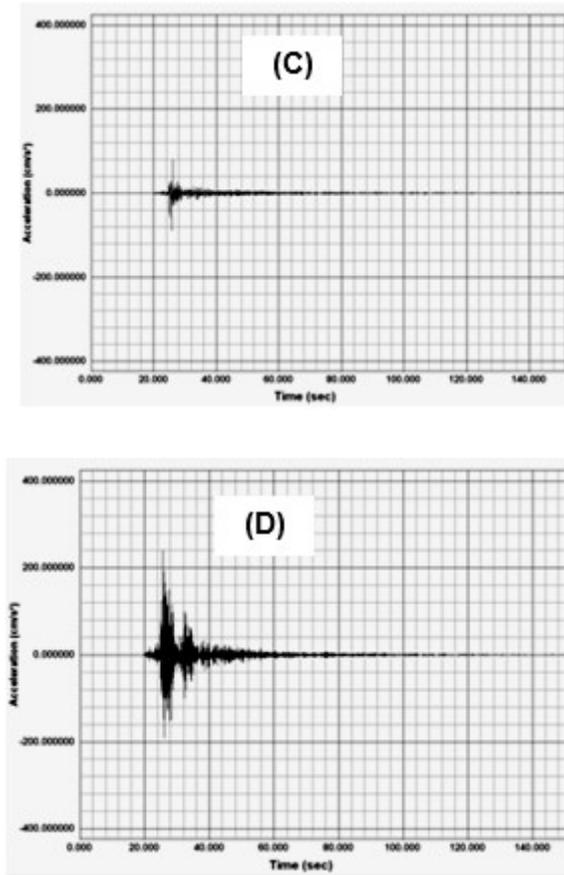


Figura 35. Acelerogramas del sismo del 05/08/2006. C) En el techo del edificio aislado; D) En el techo del edificio de base fija.

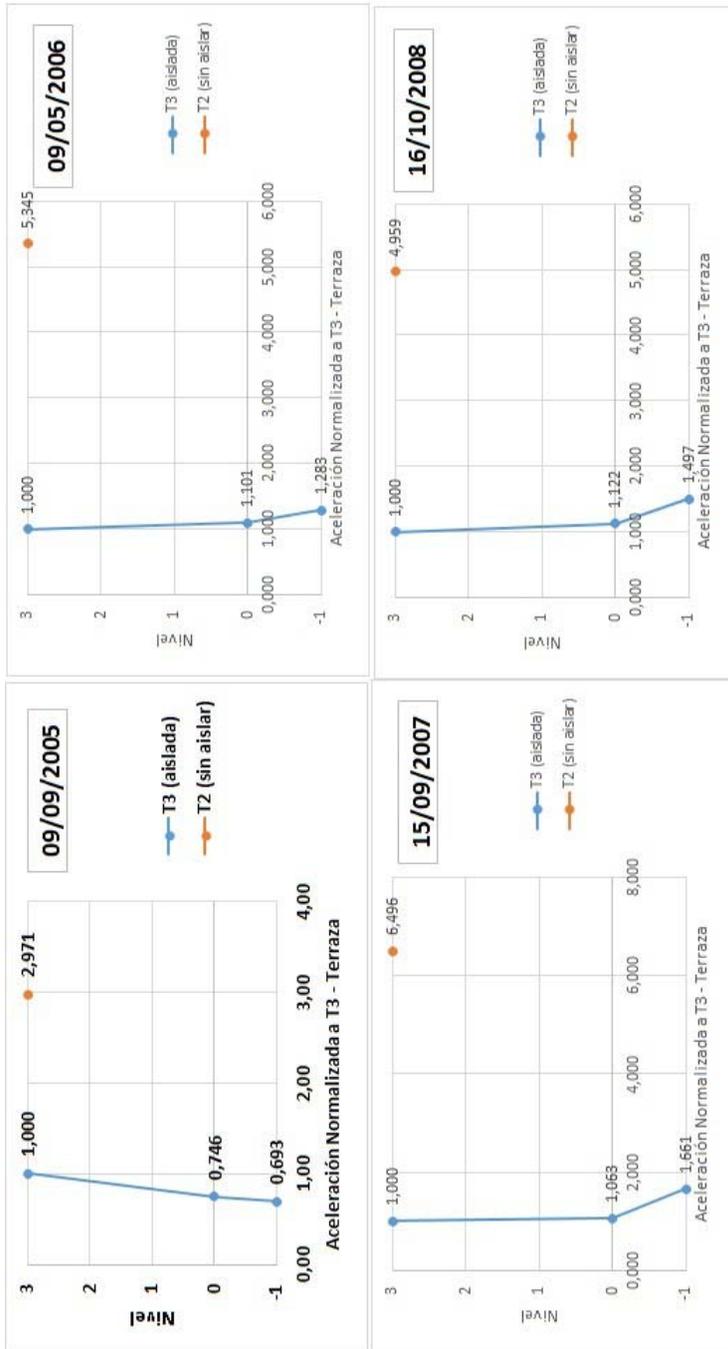


Figura 36. Aceleraciones registradas en cinco sismos sensibles. Edificio aislado (GCS). Edificio de base fija (BF) (2º Parte)

Referencias

- Aguiar R., (2007). *Dinámica de estructuras con MATLAB*. Quito, Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p.,.
- Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P y Suárez V., (2008). *Aisladores de base Elastoméricos y FPS.*, Quito, Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. 292 p.,.
- Aguiar R., Tornello M., (2009). Modelo propuesto para el análisis sísmico de estructuras con aisladores se base tipo resortes. *ENIEF 2009*. ID-20. Publicado en Actas del Congreso. Tandil. Buenos Aires. Argentina.
- Aguiar R., Tornello M., Gioacchini G., (2009). Estimación de la respuesta sísmica de un edificio aislado mediante un modelo matemático sintético. *Encuentro de Investigadores y docentes de la Ingeniería. ENIDI 2009*. FRM UTN. Publicado en las Actas del Congreso. San Rafael. Mendoza. Argentina.
- Bozzo L., Mahin S., (1990). Response of elastic single degree of freedom systems supported on FPS connections. *Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley*. Report N. – UCB/EERC-89/09, 89/09. Chapter 8, 189-194. Berkeley.
- Bozzo L M., Mahin S. A., Zayas V. A., (2000). Design of friction base isolation systems. *4th US National Conference on Earthquake Engineering*. Palm Spring, California.
- Constantinou M. C.; Tadjbakhsh, I. G., (1984) The optimum design of a base isolation system with frictional elements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, 203-214.
- Constantinou M. C., Mokha, A. S., Reinhorn, A. M., (1990). Teflon bearing in base isolation II: Modelling. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 116 (2), 455-474.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico, (2011). Protección Sísmica de Estructuras. Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. Documento Técnico N° 29. www.cdt.cl
- De La Llera J. C., Inaudi J. A., Lüderss C. (1998). Análisis y diseño de sistemas de aislación sísmica y disipación de energía. SIRVE.
- Fenz D. M. and Constantinou M. C. (2008). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 37:163-183
- Kelly, J. M., (1991). Base Isolation: Linear theory and design. *Earthquake Spectra*, 7 (2), 301-323.
- Kelly J. M., (1993, 1996 2nd edition). *Earthquake-Resistant Design With Rubber*. Springer – Verlag. London.
- Kulkarni J.; Jangrid R., (2002). Rigid body response of base-isolated structures. *Journal of Structural Control* (9), 171-188.
- Martelli, A., (2005). Modern Seismic Protection Systems for Civil and Industrial Structures. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas. Concepción. Chile. CD. ISSN 0718-2678*.
- Mokha, A. S., Constantinou, M. C., Reinhorn, A. M., (1988). Teflon Bearing in A seismic Base Isolation: Experimental Studies and Mathematical Modeling. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEEER-88-0038. State University of New York at Buffalo.
- Mokha, A. S., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., (1990). Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of Sliding Isolation System with a Spherical Surface. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEEER-90-0020. State University of New York at Buffalo.

- Naeim F.; Kelly J. M., (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*. Edit. John Wiley & Sons, Inc. Printed in the United States of America.
- Stuardi J., Massa J., Brewer A., (2005). Eficiencia de Sistemas de Aislamiento Sísmico basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos comparada con aisladores tradicionales goma – metal. *VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional*. CD. Noviembre 2005. Buenos Aires, Argentina. Facultad Ingeniería y Ciencias Exactas. Centro Estudios Avanzados Universidad Argentina de la Empresa.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2003). Desarrollo e implementación de un sistema de aislación sísmica para un edificio civil. *XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica*. Agosto de 2003. Mendoza. Argentina. CD. Paper 28. pp. 18.
- Tornello M., Sarrazin M., (2003). Protección de estructuras mediante aislamiento sísmico ubicadas en zonas de falla cercana. *XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. Octubre 2006. Mar del Plata. Argentina.
- Tornello M., Michelini R., Pizarro N., (2004a). Solución habitacional para estudiantes universitarios. Descripción del proceso constructivo de un edificio con aislación sísmica de base. Modelo de referencia. Proyecto VIS. *II Simposio de la Vivienda en la sociedad de hoy*. Octubre-2004. Facultad Regional Mendoza. Argentina. Paper en CD.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2004b). Desarrollo e implementación de un sistema de aislación sísmica de base para el edificio de la residencia universitaria de la Facultad Regional Mendoza de la UTN. *Revista Internacional de Estructuras*. Editores: Barbat A., Aguiar R., Revista semestral de la Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador. Vol. 9, N° 1, 2004. pp. 71-91. SIN 1390-0315. © 2004 ESPE, Quito. Ecuador.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2004c). Respuesta dinámica en término de desplazamientos de un edificio con aislación sísmica de base para sismos de falla cercana. *XVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. Septiembre de 2004. Buenos Aires. Argentina. Paper en CD.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2004d). Implementación de un sistema de aislación sísmica para el edificio de la residencia universitaria de la Facultad Regional Mendoza. *Revista de Ciencia y Tecnología «Proyecto Leonardo»*. Editor: Facultad Regional Mendoza. Año 0. Vol. 1. Julio-2004. CD. SIN 1668-5784.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2005a). Respuesta estructural de dos sistemas de aislamiento sísmico frente a terremotos de fuente cercana. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. *IX Jornadas*. Noviembre de 2005. Paper N° A13-04. CD. SIN 07118-2678.
- Tornello M., Sarrazin A. M., (2005b). Control de desplazamiento de sistemas de aislamiento sísmico de base, para terremotos de falla cercana. *Primer encuentro de investigadores y docentes en Ingeniería*. *EnIDI*. Octubre de 2005. FRM. UTN, Facultad de Ingeniería. UNC. Mendoza. Argentina. ISBN 987-43-9997-X.
- Tornello M., Sarrazin M., (2007). Dynamic response of a Building with base isolation for near-fault motions. *9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Paper N° 1057. Ottawa. CAEE, ACEP. Junio 2007. Ottawa. Canadá.
- Tornello M.E.; Frau C.D; Palazzo G. (2008). Behaviours of energy dissipation devices and seismic isolation in presence of near-fault ground motions. *Proceedings 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China. Octubre 2008.
- Tsopelas, P., Constantinou, M. C., (1994). NCEER-Taisei Corporation Research Program on

Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of a System Consisting of Sliding Bearing and Fluid Restoring Force/Camping Devices. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER-94-0014. State University of New York at Buffalo.

Recibido: junio/2017

Aceptado: abril/2018

Sistema de iluminación inteligente: propuesta para su implementación en zonas frías

Intelligent lighting system: proposal for its implementation in cold areas

Guillermo Villalba¹ ; Carlos Cadena¹

Resumen

Se presentan los fundamentos para el desarrollo de un sistema de iluminación inteligente y autónomo (para una luminaria con tres módulos LEDs de 10W cada uno, energizada por una batería de 12 V), diseñado para su funcionamiento en zonas de muy bajas temperaturas. Su eficiencia se logra a través del dispositivo Arduino Nano 3.0, para ello, se desarrolla un algoritmo que controla los distintos subsistemas involucrados. Se propone el diseño de un sistema para su aplicación en parajes de difícil acceso, sin cobertura de servicio eléctrico, permitiendo el alumbrado de perímetros, cercos, caminos, accesos, etc. El calor excedente de las luminarias, se transfiere al acumulador, lo que permitirá mantenerlo a una temperatura adecuada para su funcionamiento. Como resultado, se obtendrá una luminosidad mínima o básica durante las horas de encendido nocturno, pero incrementando su flujo luminoso ante la presencia de un vehículo, persona u objeto en movimiento en caminos o pasos obligados.

Palabras clave: iluminación inteligente - fotovoltaico -led - acumulador - litio - Puna

Citar: Villalba, G. y Cadena, C. (2018). Sistema de iluminación inteligente: propuesta para su implementación en zonas frías. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva Serie.* [Salta- Argentina], núm 10: 105-118

Abstract

The foundations are presented for the development of an intelligent and autonomous lighting system (for a luminaire with three LED modules of 10W each, energized by a 12 V battery), designed for operation in areas of very low temperatures. Its efficiency is achieved through the

¹ Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, INENCO. Av Bolivia 5150 -Salta. Argentina.

Arduino Nano 3.0 device, for which an algorithm is developed that controls the different subsystems involved. It is proposed the design of a system for its application in places of difficult access, without electric service coverage, allowing the lighting of perimeters, fences, roads, accesses, etc. The surplus heat of the luminaires is transferred to the accumulator, which will allow it to maintain it at a suitable temperature for its operation. As a result, a minimum or basic luminosity will be obtained during the hours of nocturnal lighting, but increasing its luminous flux in the presence of a vehicle, person or object moving on roads or obliged steps.

Key words: intelligent lighting - photovoltaic - led - accumulator - lithium - Puna.

1. Introducción

Desde su invención en el año 1962 por Nick Holonyak, el diodo emisor de luz, más conocido como LED ha evolucionado notablemente caracterizándose por su alta eficiencia y bajo consumo energético; pero el mayor salto de esta tecnología para sistemas de iluminación se produjo en el año 1997, al crearse el diodo emisor de luz blanca, dispositivo que resulta fundamental en luminarias de muy bajo consumo y larga duración (Hernández, 2012). Los altos niveles de luminosidad que ofrece la tecnología LED provocaron que los sistemas de iluminación tradicionales (lámparas incandescentes, lámparas de descarga, etc.) estén siendo gradualmente sustituidos en casi todos los ámbitos de la vida cotidiana (Fillipo Rugeles, 2010). La utilización de LEDs en sistemas de iluminación autónomos permitió extender considerablemente la duración de las baterías utilizadas en los citados dispositivos, más aún, si se considera que la incorporación de paneles fotovoltaicos posibilitó el desarrollo de sistemas de iluminación autónomos totalmente independientes de la red eléctrica tradicional y, como consecuencia de ello, es que el continuo funcionamiento de los citados sistemas no dependa de la generación de energía obtenida por métodos ó mecanismos que puedan contaminar el medio ambiente (centrales térmicas convencionales) para la recarga permanente de sus acumuladores, debido a que la energía necesaria la obtienen directamente de la radiación solar a través de paneles ó módulos fotovoltaicos (Serrano, 2009).

Los sistemas de iluminación autónomos con tecnología LED ofrecen una alternativa en cuanto a iluminación eficiente para grandes y pequeños centros urbanos, ya que eliminan el costo del cableado de distribución para su funcionamiento. Entre las ventajas de su utilización resalta la reducción de la contaminación visual sobre todo en caminos turísticos, su extensa vida útil, escaso mantenimiento, excelente niveles de iluminación y, la más relevante, la protección del medio ambiente, siendo una costosa inversión que se amortiza con el tiempo (Bargalló, 2015). Los poblados muy alejados de cualquier punto de distribución del sistema de eléctrico convencional encuentran una alternativa en cuanto a iluminación artificial para sus caminos o sus accesos

El mercado local e internacional no ofrece sistemas de iluminación autónomos para su funcionamiento a temperaturas por debajo de los -40°C (PROILED, 2015). Tampoco se encuentra evidencia de que, en el estudio y el desarrollo de equipos de iluminación autónomos, su

análisis principal se centre en las características de su funcionamiento en valores extremos de temperatura, sobre todo en temperaturas que puedan producir el congelamiento del acumulador. Las bajas temperaturas son un enemigo letal para las baterías, independientemente del tipo de material con el cual se construyan, una consecuencia inmediata es la reducción en su rendimiento y de su vida útil. Incluso, la exposición de la batería a niveles de temperaturas en los extremos de su rango normal de funcionamiento puede provocar algún tipo de daño permanente a la misma (Viera Pérez, 2003). Por lo tanto, para aquellas pequeñas regiones o zonas urbanas con climas extremos caracterizadas fundamentalmente por muy bajas temperaturas, no se dispone de un sistema de iluminación que pueda brindar una solución efectiva a sus necesidades. Tal es el caso de la Puna.

La Puna de Argentina es una extensa región cuya principal característica son los altos niveles de radiación solar, las bajas temperaturas, las fuertes ráfagas de viento y la falta de precipitaciones, es decir, se trata de una zona de condiciones climáticas extremas. En algunos sectores de la Puna se asientan pequeños poblados en sitios de gran altura, alejados de los servicios de redes eléctricas convencionales; suministros de energía que son indispensables para proporcionar la corriente eléctrica necesaria para el accionamiento de equipos de iluminación exterior para caminos, perímetros iluminados, frentes de instituciones públicas y diversos tipos de señalizaciones (Navone, 2003).

La tecnología LED para su óptimo funcionamiento requiere de bajas temperaturas, todo lo contrario de lo que ocurre con las baterías que solo operan dentro del rango de temperaturas para el cual fueron diseñadas. Por otra parte, los altos niveles de radiación presentes en la Puna permiten obtener un máximo rendimiento de los paneles fotovoltaicos, siempre que se encuentren instalados con un adecuado ángulo de orientación y con la utilización de un regulador de tensión estable (Luque, 2012). Las dos magnitudes consideradas, bajas temperaturas durante la noche y altos niveles de incidencia de radiación solar fueron el punto de partida para dar una respuesta a la situación planteada mediante el aprovechamiento térmico de la energía solar, recurso energético muy valioso. Para ello se tiene previsto el diseño de un gabinete que aloja los LEDs, las baterías y la electrónica de control en compartimentos independientes a temperatura aproximadamente constante, aislados térmicamente del exterior. Se propone el diseño de un gabinete con una pequeña ventana de vidrio en su parte superior, debajo de la cual se encuentra una placa negra; a través del vidrio ingresa la energía solar, la cual es absorbida por la placa calentando el recinto del gabinete donde se aloja la batería. También se trata de impedir que la energía escape al exterior, entonces el calor se conserva dentro del recipiente, distribuido entre los distintos compartimentos a distintas temperaturas. Durante la noche, al descender la temperatura exterior, el aislamiento térmico del gabinete impide que la temperatura interna descienda demasiado.

El diseño de un gabinete de las características mencionadas ofrece una solución para el acondicionamiento térmico de los distintos elementos involucrados en el sistema. El desarrollo de un software específico permite que la electrónica de control administre en forma eficiente los distintos subsistemas que conforman el sistema de iluminación propuesto, extendiendo aún más la energía disponible del acumulador; ya que durante la noche, los LED se activan a la mitad de su potencia máxima y sólo se activan a la potencia máxima ante la presencia ó paso de un vehículo ó persona en las proximidades del sistema de iluminación autónomo para que, luego de

transcurrido un tiempo prudencial, se reduzca la luminosidad y el consumo del sistema. Este uso eficiente de la energía disponible permite que el sistema de iluminación pueda operar por varios días, aún sin la recarga de la batería durante días nublados.

El presente trabajo expone el desarrollo de una propuesta, a los efectos de brindar una solución, para los pequeños poblados de la Puna alejados de los puntos de distribución de energía eléctrica en cuanto al diseño de un sistema de iluminación totalmente inteligente y autónomo mediante el diseño novedoso de un gabinete que permita el aprovechamiento térmico solar durante el día, manteniendo un adecuado nivel de temperatura en horas de la noche de los dispositivos alojados en su interior; y que aprovechará los altos niveles de radiación solar presente en la zona, casi todos los días del año, para cargar una batería que permitirá la autonomía del sistema. El desarrollo de un software propio facilitará la administración y el correcto funcionamiento del sistema por intermedio de una adecuada electrónica de control.

2. Materiales y métodos

Se propone el diseño de un gabinete donde se alojan casi todos los subsistemas involucrados del sistema de iluminación autónomo, con excepción del panel fotovoltaico, el diseño innovador del gabinete permite retener el calor del sol y aprovechar el calor generado por las luminarias durante la noche, a los efectos de mantener a los distintos dispositivos que conforman el sistema de iluminación dentro de su rango de temperatura de funcionamiento óptimo (30°C a -40°C.). El gabinete se subdivide en compartimentos aislados térmicamente entre sí, en uno de los extremos superiores del gabinete se coloca una ventana de vidrio semitransparente que atrapa la radiación solar impidiendo su salida, que en conjunto con el revestimiento térmico interno almacena el calor durante el día, el cual se distribuye a lo largo del gabinete. Por debajo de esta ventana captadora de radiación solar se ubica una batería y, por debajo de la misma, se colocan los disipadores de calor de la luminaria, a los efectos de mantener un nivel de temperatura muy estable sobre la batería, ya que es un elemento muy sensible a los cambios de temperatura, situación que no ocurre con los restantes subsistemas que pueden funcionar óptimamente con cambios moderados de temperatura.

El sistema de iluminación autónomo transforma la radiación solar obtenida en energía eléctrica mediante un panel fotovoltaico, el cual establece un potencial eléctrico que puede variar entre 0 a 17V, dependiendo del nivel de radiación solar que pueda impactar sobre el mismo. La corriente eléctrica se regula mediante un regulador de corriente del tipo PWM, el cual proporciona un nivel de tensión estabilizada que permite la carga de una batería de 12V (Grupo NAP, 2003). Para alcanzar una mayor autonomía del sistema desarrollado se utiliza un acumulador de 12V, el material empleado para el diseño de este tipo de baterías le permite resistir bajas temperaturas. Si se optare por baterías de Litio se mejoraría el rendimiento, con el incremento de costo correspondiente. Estas se caracterizan por su alto rendimiento, diseño compacto, alta eficiencia en carga y descarga (Viera Pérez, 2003).

Se emplea una luminaria con tecnología LED con tres módulos de 10W cada uno. El número de módulos LED activados dependerá del nivel de energía disponible en la batería (Vázquez Guzmán, 2006; PRONUREE, 2015; Arteaga 2009). Para determinar la existencia ó no de luz solar, se diseña un subsistema con un sensor del tipo LDR, mediante un circuito acondiciona-

dor; el cual al captar la luz solar, envía un potencial de 5V (1 lógico) al subsistema de control, indicando que es de día. En presencia de oscuridad envía una tensión de 0V (0 lógico), indicando que es de noche.

Al inicio de la noche y para determinar el nivel de potencia instantánea presente en el sistema, se construye un subsistema de carga. El subsistema permite establecer una carga cuyo consumo de potencia reemplaza durante algunos instantes el comportamiento de las luminarias LED en cuanto a consumo. Lo que facilita a los subsistemas de tensión y corriente enviar datos al subsistema de control Arduino para operar en consecuencia.

Se emplea como subsistema de control un dispositivo Arduino Nano 3.0 (Productos Arduino, 2015) con una tensión de alimentación regulada de 6V. Se requieren 6 salidas digitales y 3 entradas analógicas para establecer la comunicación necesaria con los restantes subsistemas que constituyen el sistema de iluminación. El algoritmo de control que corre sobre Arduino Nano se desarrolla en lenguaje C++ tratándose de un software de diseño propio, el cual permite a la electrónica de control administrar en forma eficiente a los distintos subsistemas involucrados (Reig Chiva, 2012).

Para determinar la potencia de consumo instantánea en el sistema desarrollado durante su funcionamiento, se recurre a un sensor de tensión y un sensor de corriente. El sensor de tensión se basa en el diseño de un circuito constituido por un divisor de tensión y un circuito integrado operacional. Para el sensor de corriente se utiliza un dispositivo integrado del tipo ACS712, sensor basado en el efecto hall.

A los efectos de reducir el consumo de energía durante la noche, se diseña un subsistema sensor de movimiento constituido por un sensor infrarrojo (surgieron dos propuestas: un sensor con fototransistores con alcance de 4 mts. y un ángulo de cobertura aproximado de 45°, y un sistema fotosensor comercial con alcance de 14 y 180° de cobertura). El sensor cuando detecta el movimiento de algún objeto a una determinada distancia envía al subsistema de control Arduino Nano un nivel de tensión de 5V, indicando que encienda todas las luminarias de acuerdo a la potencia máxima medida. Ante la ausencia de detección de un objeto en movimiento se envía un nivel de tensión de 0V, esto indica que sólo una única luminaria estará encendida de acuerdo a la potencia medida.

El presente trabajo centra su estudio en el máximo aprovechamiento de la radiación solar disponible y en el mayor rendimiento del sistema de iluminación autónomo, ello se logra con el diseño de un gabinete que permite el acondicionamiento térmico de los subsistemas implicados y del desarrollo de un software que permita un óptimo control del sistema en su conjunto, reduciendo notablemente el consumo de energía eléctrica para alcanzar una máxima autonomía del sistema de iluminación.

Se expone la elaboración de una metodología que permita el diseño y el cálculo para la construcción de un sistema de iluminación exterior, inteligente y autónomo, cuya fuente de energía se obtendrá a partir de paneles fotovoltaicos.

El esquema general del sistema desarrollado y los distintos subsistemas involucrados se exponen en la Fig. 1, indicándose mediante líneas el sentido de interacción entre los mismos.

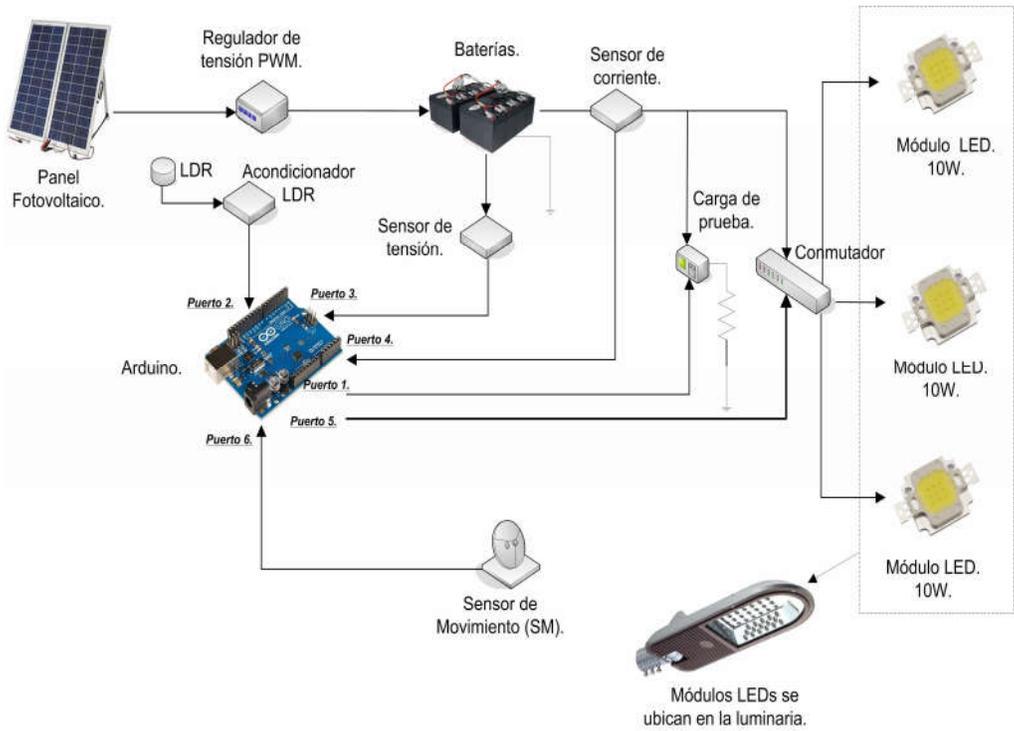


Figura 1. Esquema del sistema de iluminación inteligente y autónomo propuesto.

El sistema responde a una lógica de control de desarrollo propio expuesta en la Tab. 1.

Tabla 1. Lógica de funcionamiento del sistema.

LDR = 0			
SM = 0		SM = 1	
Potencia medida [W]	Estado de la Luminaria (Activada)	Potencia medida [W]	Cantidad de luminarias activadas
$P \geq 30$	SI	$P \geq 30$	3
$20 < P < 30$	SI	$20 < P < 30$	2
$10 < P < 20$	SI	$10 < P < 20$	1
$P < 10$	NO	$P < 10$	0

Observaciones:

LDR (Resistor dependiente de la luz - Light dependent resistor): Subsistema que en estado lógico «0» indica, al subsistema de control, que es de noche. En estado lógico «1» indica que es de día, en este último caso no se activa ninguna luminaria y se aprovecha la energía solar disponible para la carga de la batería.

SM (Sensor de Movimiento): Subsistema que en estado lógico «0» indica, al Arduino Nano, que no hay objeto en movimiento. En estado lógico «1» indica la presencia de un objeto en movimiento.

P: Indica la potencia instantánea medida consumida en el sistema.

El panel fotovoltaico empleado responde a las características técnicas detalladas en la Tab. 2.

Tabla 2. Panel Fotovoltaico KD50SE-1P

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	UNIDAD	VALOR
Tipo de módulo PV.		KD50SE-1P
A 1000 W/m ² (STC).		
Potencia nominal P	W	50
Tensión de sistema máx.	V	750
Tensión con potencia nominal.	V	17,9
Corriente con potencia nominal.	A	2,80
Tensión marcha en vacío.	V	22,1
Corriente de cortocircuito.	A	3,07
Longitud.	mm	706 (±2,5)
Ancho.	mm	744 (±2,5)
Altura / incl. caja de contacto.	mm	36 / 45
Peso.	kg	6,5
Caja de contacto.	mm	150 x 140 x 37,2
Tipo de conexión.		bornes atornillables
Código IP.		IP65
Certificado.		IEC 61215 ed. 2, IEC 61730 y Categoría de protección II

Se sugiere el montaje de un panel fotovoltaico sobre un poste de sujeción con una inclinación de 30° (Denegri, 2012), ángulo que le permita aprovechar la mayor radiación solar que pueda incidir sobre su área de recepción.

Se recomienda utilizar una batería de Litio del tipo LIT12B. Sus dimensiones son 150 mm (frente) x 65 mm (alto) x 130 mm (profundidad), con una tensión nominal de 12 V, cuya capacidad es de 35Ah y con un peso de 1 Kg.

El diseño de la luminaria permite incluir 3 módulos LED con una potencia de 10W cada uno.

El diseño del gabinete permite alojar todos los subsistemas involucrados, con excepción del panel fotovoltaico. El particular diseño de la carcasa contenedora mantiene una temperatura adecuada para el correcto funcionamiento de la batería de litio. El diseño propuesto facilita el ingreso de calor durante el día, desde el exterior hacia la batería y, durante la noche, un flujo de calor desde la lámpara (módulo LED) hacia la batería Fig. 2.

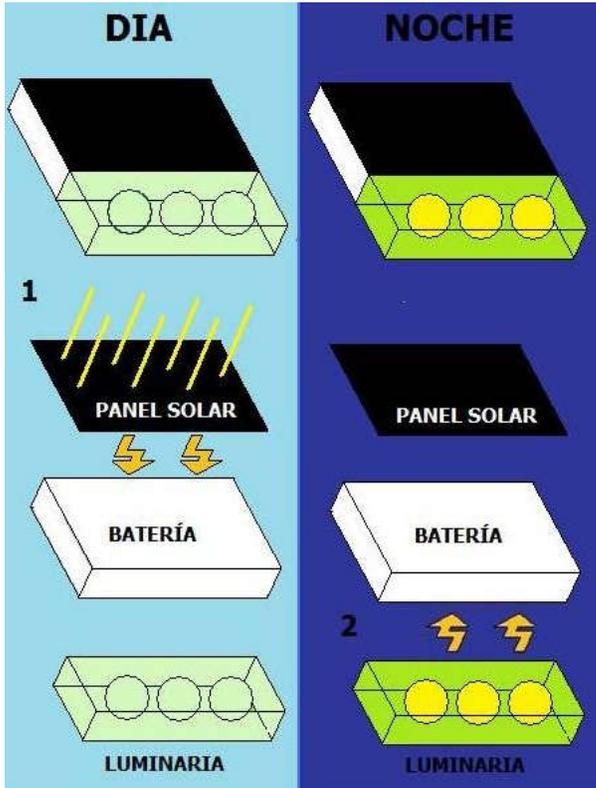


Figura 2. Acondicionamiento térmico del acumulador de energía eléctrica.

En base a la lógica de funcionamiento del sistema completo (Tab. 1), se expone el desarrollo de un algoritmo de control para permitir alcanzar la mayor eficiencia posible del sistema, el software parte del diagrama de flujo presentado en la Fig. 3.

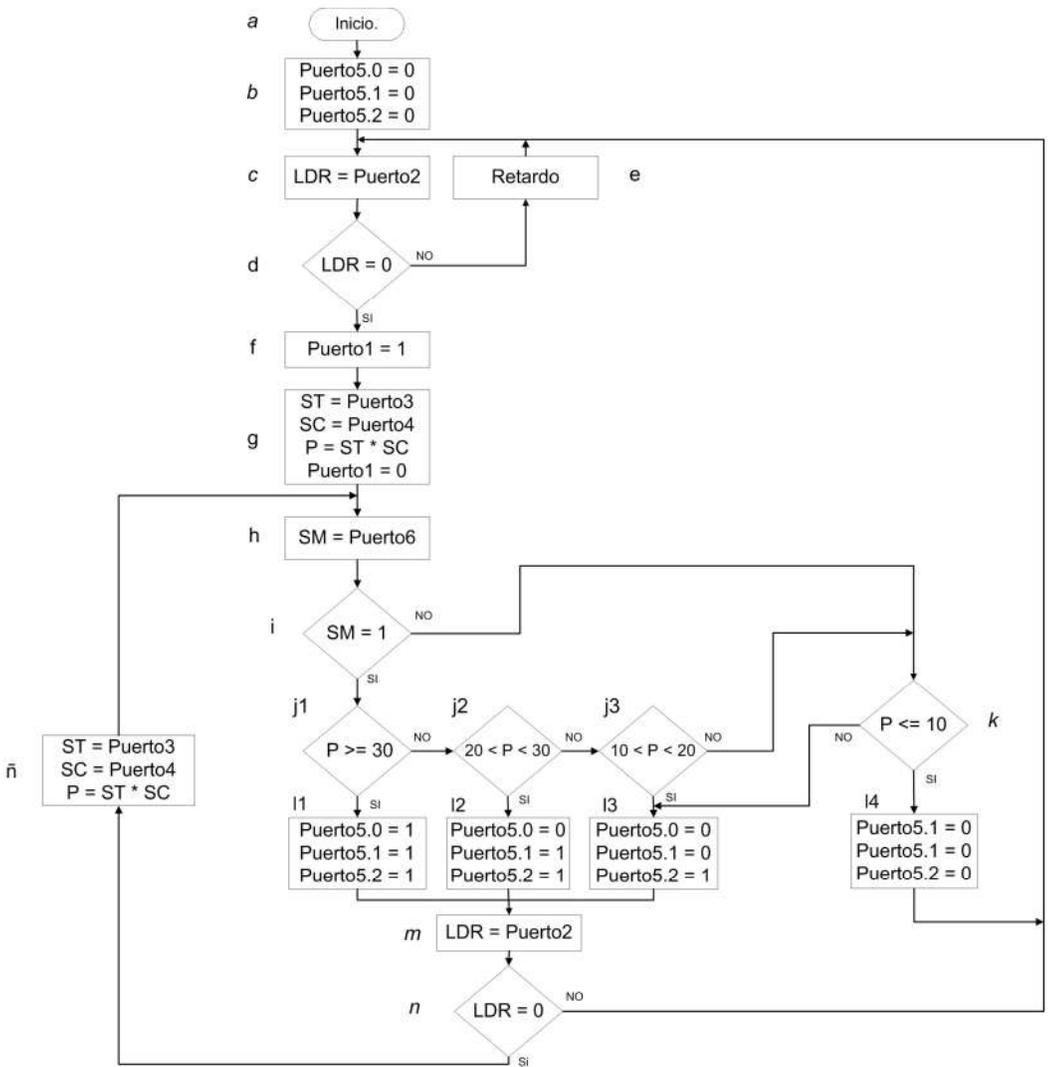


Figura 3. Diagrama de flujo.

A continuación se detalla el algoritmo de control representado en la figura 3. a) inicio. b) Los puertos de salida digital, 5.0 al 5.1, destinados a controlar el accionamiento del conmutador de los módulos LED se desactivan (tensión de 0V), a los efectos de evitar accionamientos erróneos de la luminaria LED. c) El puerto 2 (entrada digital) realiza una lectura del acondicionador LDR, quien sólo puede entregar dos niveles de tensión «0 V = 0 lógico» y «5 V = 1 lógico», almacena el dato obtenido en la variable del tipo entero «LDR». d) Se determina si existe ó no luz solar, de acuerdo al valor asignado a la variable LDR. e) Si existe luz solar, se realiza un conteo

(retardo) para luego realizar otra lectura. f) El puerto 1 (salida digital) mediante una tensión de 5V activa una carga de prueba. Esta acción permite establecer un flujo de corriente desde la batería hasta la carga de prueba. g) El puerto 3 (entrada analógica) toma un valor proporcionado por el subsistema sensor de tensión y almacena el dato en la variable del tipo real ST. El puerto 4 (entrada analógica) toma el valor suministrado por el sensor de corriente almacenándolo en la variable SC. Se realiza el producto del contenido de las variables ST y SC, con lo cual se obtiene la potencia instantánea presente en el sistema, dato que se almacena en la variable del tipo real P. Las mediciones realizadas se efectúan dentro de un retardo de tiempo, que permite el establecimiento de los sensores involucrados. Por último, se desactiva el puerto 1 con un nivel de tensión de 0V. h) El puerto 6 (entrada digital) se destina a chequear los estados del sensor de movimiento. El dato recibido se almacena en la variable SM. j) Se compara el valor contenido en la variable SM con el estado lógico «1», donde se deduce lo siguiente: Si SM almacena un «1 lógico» indica presencia de objeto en movimiento, en caso contrario no se detecta objeto en movimiento. j1, j2, j3) Se detectó un objeto en movimiento se procede a verificar el estado de potencia medido comparándolo con un valor prefijado, si es $P = > 30$, si $20 < P < 30$ y si $10 < P < 20$. 11, 12, 13) Si $P = > 30$ se activan 3 módulos LED (los puertos 5.0 al 5.2 envían un «111 lógico» al conmutador). Si $20 < P < 30$ (Se desactiva el puerto 5.0 y se activan los puertos 5.1 y 5.2 enviando un «011 lógico» al conmutador). Si $10 < P < 20$ (Se desactivan los puertos 5.0 y 5.1, activándose el puerto 5.2 enviando un «001 lógico» al conmutador). m) Se almacena en la variable LDR los estados lógicos «0» ó «1» enviados por el acondicionador LDR. n) Se verifica si existe luminosidad solar ó no. Si la variable entera contiene un «0 lógico» indica la inexistencia de luz solar, en caso contrario indica que es de día. ñ) Se realiza una nueva medición de tensión y de corriente para determinar la potencia instantánea presente en el sistema, las mediciones se realizan dentro de un retardo, lo cual permite establecer claramente las lecturas realizadas por los sensores de tensión y corriente involucrados. k) Verifica si $P = < 10$, si la condición es negativa se activa un único módulo LED (bloque 13), en caso contrario se desactivan todas las luminarias (bloque 14). Luego se repite el ciclo nuevamente desde el bloque c.

Como dispositivo de control central se recurre a una plataforma de hardware libre, la cual se basa en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo del sistema, particularmente se utiliza el Arduino Nano donde se emplean 6 de sus 14 puertos digitales de salida y 2 de sus 8 puertos de entrada/salida analógicos, proporcionando al subsistema una tensión de alimentación de 6 V. Su entorno de desarrollo permite codificar el diagrama de flujo expuesto en el lenguaje C++.

Todo el sistema se monta sobre un poste de sujeción, el cual es capaz de soportar el peso de todos los dispositivos y de las inclemencias del tiempo. Figura 4.

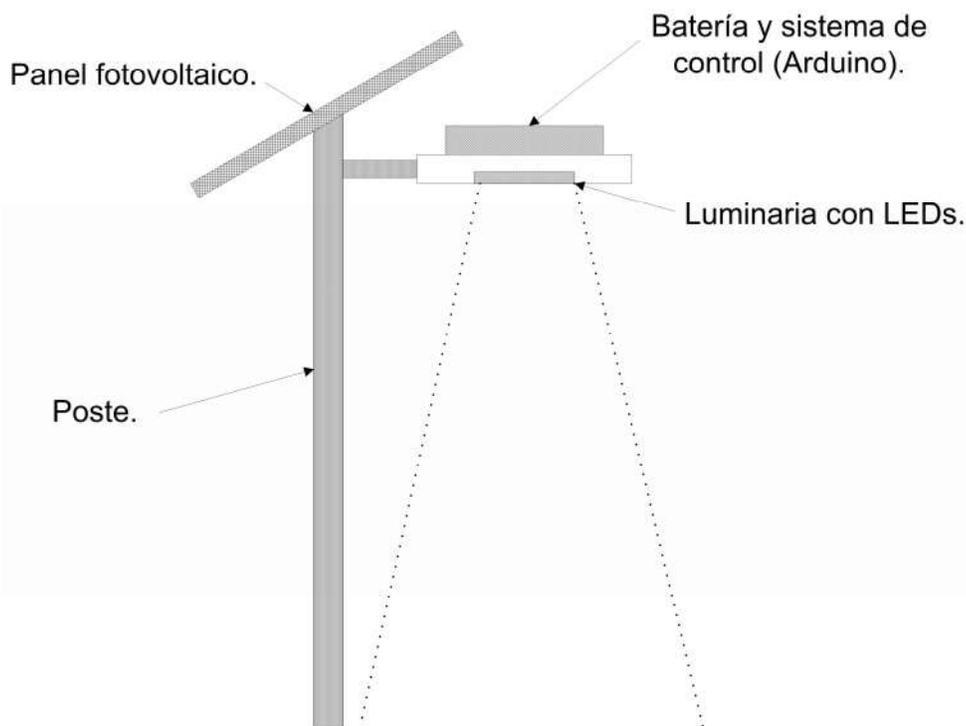


Figura 4. Sistema de iluminación inteligente y autónomo.

3. Resultados

Dimensionamiento del sistema de iluminación inteligente y autónomo: se parte de la premisa de obtener un flujo luminoso de unos 2.500 lúmenes durante unas ocho horas, el máximo consumo sólo se presenta en breves intervalos de tiempo dependiendo de la presencia de personas ó vehículos en el lugar. El resto del tiempo (ausencia de personas ó vehículos en movimiento) el flujo luminoso se reduce al mínimo, es decir, a una potencia de consumo de 10 W. Se establece que 3 módulos LED de 10 W cada uno responden adecuadamente con los requisitos establecidos. Además, se precisan 250mW para el micro controlador con tecnología Arduino Nano, de 250 mW para un sistema de detección infrarrojo y de 100mW para los restantes subsistemas involucrados (sensores, acondicionadores, conmutador, etc.). Las características de cada módulo LED son: Potencia máxima 10 W, flujo luminoso 900 Lm, vida útil 50.000 Hs. Angulo de iluminación 120°. Altura óptima 4 – 5 metros.

Estimación del consumo para un consumo 8 horas por día:

Máxima potencia de consumo (30 W): $30 \text{ W} \times 8 \text{ Hs/día} = 240 \text{ W} \times \text{horas/día}$.

Mínima potencia de consumo (10 W): $10 \text{ W} \times 8 \text{ Hs/día} = 80 \text{ W} \times \text{horas/día}$.

Arduino Nano: $0,25 \text{ W} \times 24 \text{ Hs/día} = 6 \text{ W} \times \text{horas/día}$.

Detector infrarrojo: $0,25 \text{ W} \times 24 \text{ Hs/día} = 6 \text{ W} \times \text{horas/día}$.

Subsistemas (sensores, conmutador, etc.): $0,1 \text{ W} \times 24 \text{ Hs/día} = 2,4 \text{ W} \times \text{horas/día}$.

Consumo máximo estimado: $254,4 \text{ W} \times \text{horas/día}$.

Estimación de máxima potencia para un panel del tipo KD50SE-1P de 50 W.

Potencia máxima producida en 5 HSP: $50 \text{ W} \times 5 \text{ HSP} = 250 \text{ W}$.

Se deduce que para un consumo extremo de $254,4 \text{ W} / \text{día}$, dentro de un determinado margen, no existen problemas de abastecimiento de energía.

Dimensionamiento de la batería (Aguilera, 2015): a partir de un consumo máximo (peor de los casos) de $254,4 \text{ W} / \text{día}$, se puede establecer la capacidad de la batería para suministrar la energía necesaria a la carga (Luminaria con LED). La capacidad de la batería (acumulador) viene dada por:

$$Ca = (\text{Consumo}) / (V * Pf) = (254,4 \text{ W} * 1 \text{ día}) / (12 \text{ V} * 0,6) = 35,33 \text{ Ah}$$

Donde:

«Ca» es la capacidad del acumulador.

«Consumo» es la energía consumida diariamente en W/h.

«V» es la tensión de corriente continua requerida por el sistema.

«Pf» es la profundidad de descarga de la batería.

En base a lo calculado se selecciona una batería o grupo de baterías de 100 Ah o superior, que soporten régimen de descarga de hasta un 60 % en días puntuales sin sol.

Cálculo del regulador:

La máxima intensidad que aporta el panel de 50 W viene dada por:

$$I_{mp} = P_{\text{Nominal}} / V_{mp} = 50 \text{ W} / 17,9 = 2,638 \text{ A} \approx 2,79 \text{ A}$$

El regulador debe ser capaz de resistir los 2,79 Amperios calculados como valor estándar podríamos fijarlo en 3 Amp.

Se determina que para el sistema propuesto se requiere:

1 Panel solar de 50 W.

1 Batería de 840 W (35 Ah con autonomía de 24 Hs. de uso continuo para una carga de 30 W/h).

- 1 Luminaria con 3 módulos LED de 10 W cada uno.
- 1 Regulador de 3 Amp.
- 1 Sensor infrarrojo.
- 1 Sensor LDR.
- 1 Sensor de Tensión.
- 1 Sensor de Corriente.
- 1 Carga de prueba.
- 1 Conmutador.
- 1 Poste de sujeción
- 1 Gabinete para acondicionamiento térmico.

4. Conclusiones

Este equipo de iluminación inteligente intenta dar una solución en aquellas regiones de la Puna, que no cuentan con servicio de energía eléctrica. El sistema propuesto obtiene energía a partir de la radiación solar con valores elevados en el sector referido. Para su implementación se emplean también lámparas LED por su buen desempeño en condiciones extremas de temperatura. El acondicionamiento térmico del acumulador se consigue del calor residual de las luminarias. En general, las características de diseño permiten que se aproveche al máximo la energía disponible tanto térmica como fotovoltaica. Se pretende un producto de bajo costo, eficiente y totalmente autónomo con la capacidad de aumentar la intensidad de iluminación de las luminarias cuando se detecta la presencia de personas ó vehículos. Se estima una autonomía de 24 Hs. continuas con una potencia 30 W (LED) en condiciones normales de radiación y temperatura.

Debido a que el sistema propuesto se diseñó en base a las características climáticas y físicas que presenta la Puna, se exponen futuras líneas de acción que pueden enriquecer las prestaciones del dispositivo propuesto: emplear un único módulo LED con lo cual se deberá modificar el algoritmo de control desarrollado a los efectos de optimizar el sector a iluminar; mejorar la sensibilidad y el alcance del sistema fotosensor utilizado ó seleccionado con el fin de que el sistema pueda ser empleado en todo tipo de zonas de bajas temperaturas y permita detectar vehículos que se desplacen a gran velocidad; diseñar un sistema seguidor solar para alcanzar un mayor aprovechamiento energético por parte de los paneles fotovoltaico sin que el consumo del mismo afecte o disminuya el rendimiento de la luminaria LED, etc.

5. Referencias

- Aguilera, J., Hontoria, L. (2015). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. CIEMAT. España.
- Ángeles Arteaga, J. D., De Jesús Sánchez, J. J., y Rosales, S. S. (2009). Propuesta de alumbrado público por medio de celdas fotovoltaicas con luminarias tipo LEDs para la manga, municipio de la Yesca en el estado de Nayarit. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional. México.

- Bargalló, R. (2015). Nuevo sistema de Iluminación pública con energía eólica y solar. Equipamiento y servicios municipales, núm. 171, pp. 24-27
- Denegri, C., Raichijk, H., Grossi Gallegos (2012). «Evaluación de diferentes modelos utilizados para la estimación de la radiación fotosintéticamente activa en planos inclinados». Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16, 2012. ISSN 03 29-5184. Argentina.
- Fillipo Rugeles, V. H., Cano Garzón, H. B., Chaves Osorio, J. A. (2010) Aplicaciones de iluminación con LEDs. Scientia Et Technica, vol. XVI, núm. 45, pp. 13-18.
- Grupo NAP. (2003). Energía solar fotovoltaica. Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación. ISBN: 978-84-935049-6-0. Madrid.
- Hernández, I. M. (2012). LED. Evolución en iluminación. Unidad académica de física, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- Luque L., Toranzo V, Vera L. (2012). Uso eficiente de la energía en sistemas fotovoltaicos autónomos: desarrollo de un convertidor cc-cc con seguimiento de punto de máxima potencia.
- Navone, S., Bosio, M. J. (2003). Región PUNA. CIATE. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Productos Arduino (2015). <https://www.arduino.cc>
- PROILED (2015). <http://www.proiled.com/93-poste-solar>.
- PRONUREE (2015). Especificación Técnica para la adquisición de luminarias de Alumbrado Público con LED. Secretaría de Energía. <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3102>. República Argentina.
- Reig Chiva, S. (2012). Plataforma de experimentación para prototipado de diseño mediante Arduino. Universidad de la Rioja. España.
- Trujillo Serrano, P. J. (2009). Tecnología de los sistemas de energía solar fotovoltaica. Universidad Internacional de Andalucía.
- Vázquez Guzmán, G. (2006). Tecnología de iluminación mediante LEDs de potencia. Tesis de Maestría en ciencias. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, Morelos. México.
- Viera Pérez, J. C. (2003). Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos. Universidad de Oviedo.

Recibido: junio/2017

Aceptado: abril/2018

Perfil académico -profesional de los autores

BRESLIN, ROBERTO

Ingeniero Electrónico con Orientación Electrónica y especialista en Educación y Tics, Técnico Electrónico. Se desempeña como Jefe de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Católica de Salta y como Docente Adjunto en Sistemas de Conmutación y Auxiliar en Antenas. Docente de Electrónica, Bioelectrónica y Electrotecnia en UFIDET. Investigador del IESIING (Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería-UCASAL). Ex Director General de Educación Superior de la Provincia de Salta.
rbreslin@ucasal.edu.ar

CADENA, CARLOS

Doctor en Ciencias - Área Energías Renovables (UNSa) e Ingeniero Electrónico (UNT). Profesor Titular Regular, Dedicación Exclusiva (Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas - UNSa). Docente Investigador Categoría I. Integrante de las Comisiones Postgrado: Doctorado en Ciencias, Comité Académico: Doctorado Ciencias Área Energías Renovables, Especialización y Maestría en Energías Renovables. CPA de CONICET desde 1983; Ex Vicerrector de la Universidad Nacional de Salta. Integrante de Comisión del Consejo económico social de la Provincia de Salta, mesa energías renovables. Junta Técnica CONICET.
cadenacinenco@gmail.com

GIOACCHINI, GUSTAVO

Ingeniero Civil con Orientación en Construcciones y Vías de Comunicación. Doctor en Ingeniería, Mención Civil-Ambiental y Especialista en Ingeniería Estructural Sismorresistente (Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza). Profesor Adjunto - U. T. N. - Facultad Regional Mendoza. Investigador del CEREDETEC: Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, la Sismología e ingeniería Sísmica de la Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional. Autor de varios artículos científicos de su especialidad.

HAARALA, MIKA

MSC en Matemáticas, por la Universidad de Joensuu, Finlandia. Es investigador del Instituto de Estudios interdisciplinarios de Ingeniería de la UCASAL, en el área de Matemática Aplicada y Estadística. Miembro del Grupo de Riesgo Sísmico. Tiene varias publicaciones sobre el tema.
mikahaarala.orosco@gmail.com

HORVATH, EMILIANO

Ingeniero Electricista con orientación Electrónica, especialista en Telecomunicaciones Telefónicas. Se desempeña como Profesor Adjunto de la Universidad Católica de Salta en Sistemas de Comunicaciones y como Auxiliar en Sistemas Inalámbricos. Se desempeña profesionalmente en Telecom Personal, en el área de Implementación Movil, BSC/RNC/CORE y LTE. Ha realizado cursos en Ericsson, Nokia y Huawei.
hhorvathee@gmail.com

NARVÁEZ, PABLO RODRIGO

Ingeniero Electrónico, doctorando de Ingeniería en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la U. N. T. Profesor Adjunto en Electrónica, Mediciones Eléctricas y Electrónicas, Técnicas Digitales, Análisis de Señales y Electrónica Aplicada a Plantas Transmisoras. Investigador del IESIING (Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería-UCASAL). Posee una extensa trayectoria en el ámbito privado a través de desarrollos de automatismos.
efeparo@yahoo.com.ar

PARRA DE GALLO, H. BEATRIZ

Ingeniero en Computación (UCSE), Master en Administración de Negocios (UCASAL), actualmente se encuentra cursando el Doctorado en Ingeniería Mención Sistemas de Información (UTN-FRSF). Integra el Grupo de Forensia Digital del IEsIng, y es docente de la carrera de Ingeniería en Informática de la UCASAL. Cumplió diversas funciones de gestión académicas en la Facultad de Ingeniería de esa universidad. En el ámbito privado se desempeña como Directora Comercial en la empresa IRUYA INGENIERIA SRL.
bgallo@ucasal.edu.ar

RIVADERA, GUSTAVO

Ingeniero en Computación orientación Programación por la Facultad de Matemática Aplicada, Universidad Católica de Santiago del Estero. Tiene una Maestría en Ingeniería del Software por el Instituto Tecnológico de Buenos Aires y la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente se desempeña como Analista Senior en el Ministerio Público de Salta y como docente en la Universidad Católica de Salta y Universidad Nacional de Salta.
grivadera@ucasal.edu.ar

TORNELLO, EDUARDO

Ingeniero en Construcciones, Doctor en Ingeniería, por la UTN, Facultad Regional de Mendoza. Especialistas en Estructuras de Hormigón Armado (Politécnico de Milán), Especialista en Ingeniería Estructural Sismorresistente, (U.T.N- Facultad Regional Mendoza). Su principal actividad académica la realiza en el Departamento de Ingeniería Civil y en el Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CEREDETEC), de la U.T.N Regional Mendoza. Profesor Titular en la Carrera de Ingeniería Civil de Facultad Regional Mendoza, UTN y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo. Docente de Posgrado en el Doctorado en Ingeniería men-

ción Civil – Ambiental; en la Maestría en Ingeniería Estructural Sismorresistente; en la Especialización en Patología y Terapéutica de Edificios de la Facultad Regional Mendoza; en la Maestría en Ingeniería Estructural en la Facultad Regional Buenos Aires y la Facultad Regional General Pacheco.

mtornello@gmail.com

VILLALBA, GUILLERMO

Ingeniero en Informática (UCASAL) y Electrónico Universitario (UNSa). Docente en la Facultad de Ingeniería de la UCASAL. Se desempeñó como encargado de los laboratorios de Telecomunicaciones y de Electrónica en la FI – UCASAL. Integrante del Grupo Interdisciplinario en Materiales (laboratorio asociado al INTECIN - UBA) y del IESIING de la Facultad de Ingeniería de la UCASAL. Se desempeñó en la Facultad de Ciencias Exactas de la UNSa como Consejero Directivo Titular del Claustro Graduados y formó parte de la comisión de Docencia del citado Consejo.

villalba110@hotmail.com

