

# GACETA

## DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM®

NÚMERO 147, MARZO - ABRIL 2021  
ISSN 1870-347X

Evaluación de intrusión  
salina en el acuífero  
Río Sinaloa, México

Instalación de estaciones  
IoT para el monitoreo y  
diagnóstico de la red de agua  
en la ciudad de Guanajuato

Aportaciones en el Clúster  
de Biocombustibles  
Gaseosos de la Unidad  
Académica Juriquilla

Evaluación multipeligro de  
la confiabilidad de estructuras  
de soporte de turbinas eólicas  
ante eventos extremos



En abril de 2021 iniciaremos, con mucho entusiasmo, una serie de eventos mensuales para celebrar los 65 años de la creación del Instituto de Ingeniería. Agradezco profundamente el apoyo brindado por los doctores José Luis Fernández Zayas, Gustavo Ayala y David Morillón para la organización y coordinación de los eventos que realizaremos en el marco de esta celebración.

El objetivo principal de estos eventos es conmemorar este aniversario, pero también invitar a la comunidad académica a reflexionar sobre varios aspectos muy importantes, que pueden permitir que tengamos un mejor instituto y para seguir aportando avances al conocimiento en ingeniería que contribuyan al desarrollo del país. Algunos de esos aspectos son la identificación de los temas de investigación a reforzar y los que tenemos que desarrollar, la optimización de nuestras formas de trabajo y de enseñanza, ética para la investigación en ingeniería, colaboración multi e interdisciplinaria, innovación y desarrollo tecnológico, así como igualdad de género, inclusión y representatividad en educación e investigación.

En este contexto, el primer evento que se llevará a cabo el 26 de abril para conmemorar el aniversario del Instituto de Ingeniería, es la mesa redonda denominada "Ciudades Inteligentes en el Instituto de Ingeniería". Durante este evento, cuatro expertos internacionales, expondrán desde su punto de vista lo que consideran podríamos hacer para conformar

con los académicos de nuestro Instituto, un grupo de expertos altamente especializados que realice de manera conjunta proyectos en este tema. En este orden de ideas, es conveniente mencionar que más del 50% de la población mundial vive actualmente en ciudades y para el año 2050, este porcentaje se incrementará a 70. Lo anterior, representa una mayor demanda de viviendas y servicios (médicos, de telecomunicación, transporte, agua y energía) y, como consecuencia de esto, mayores problemas de contaminación, de movilidad y de acceso a servicios. Todo esto, aunado a las limitantes y problemáticas que tenemos y habrá por la pandemia de la COVID-19, representan importantes retos actuales y futuros que la ingeniería, y en particular nuestro Instituto puede atender, considerando el conjunto de disciplinas que cultivamos y las capacidades que tenemos.

Finalmente, en el marco de esta celebración tengo el agrado de presentarles el logo que elaboraron Guadalupe Gutiérrez y Gabriel Fonseca, exestudiantes de maestría del Instituto de Ingeniería, a quienes agradezco por su trabajo.

Cordialmente,  
**Dra. Rosa María Ramírez Zamora**  
Directora - Instituto de Ingeniería, UNAM

## UNAM

Rector  
Dr. Enrique L. Graue Wiechers  
Secretario General  
Dr. Leonardo Lomeli Vanegas

Secretario Administrativo  
Dr. Luis A. Álvarez  
Icaza Longoria

Secretaría de Desarrollo Institucional  
Dr. Alberto  
Ken Oyama Nakagawa

Secretaría de Prevención,  
Atención y Seguridad Universitaria  
Lic. Raúl  
Arcenio Aguilar Tamayo

Abogada General  
Dra. Mónica González Contró

Coordinador de la Investigación Científica  
Dr. William H. Lee Alardín

Director General de Comunicación Social  
Mtro. Néstor Martínez Cristo

## IIUNAM

Directora  
Dra. Rosa María Ramírez Zamora  
Subdirector de Estructuras y Geotecnia  
Dr. Efraín Ovando Shelley

Subdirector de Hidráulica y Ambiental  
Dra. Rosa  
María Flores Serrano

Subdirector de Electromecánica  
Dr. Arturo Palacio Pérez

Subdirector de Unidades Académicas Foráneas  
Dr. Germán Buitrón Méndez

Secretaría Académica  
Dra. Norma Patricia López Acosta  
Secretario Administrativo  
Lic. Salvador  
Barba Echavarría

Secretario Técnico  
Arq. Aurelio López Espíndola

Secretaría de Telecomunicaciones e Informática  
Ing. Marco Ambriz Maguey

Secretario Técnico de Vinculación  
Lic. Luis Francisco Sañudo Chávez

## GACETA DEL IIUNAM

Editor responsable  
Lic. Verónica Benítez Escudero  
Reportera  
Lic. Verónica Benítez Escudero

Fotografías  
Archivo Fotográfico del IIUNAM

Diseño  
Lic. Oscar Daniel López Marín

Corrección de estilo  
Gabriel Sánchez Domínguez

Distribución  
Guadalupe De Gante Ramírez

Impresión  
Grupo Espinosa

## GACETA DEL IIUNAM

Órgano informativo del Instituto de Ingeniería a través del cual se muestra el impacto de sus trabajos e investigaciones, las distinciones que recibe y las conferencias, los cursos y los talleres que imparte, reportajes de interés e información general. Se publica los días 10 de cada mes, con un tiraje de 1500 ejemplares. Número de Certificado de Reserva otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04 2014 070409264300 109. Certificado de Licitud de Título: 13524. Certificado de Licitud de Contenido: 11097. Instituto de Ingeniería, UNAM, edificio Fernando Hiriart, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México. Tel. 56233615.

## EVALUACIÓN DE INTRUSIÓN SALINA EN EL ACUÍFERO RÍO SINALOA, MÉXICO

ROSARIO ITURBE-ARGÜELLES, LUIS CARLOS

GONZÁLEZ MÁRQUEZ, ANA ALEJANDRINA

CASTRO RODRÍGUEZ, JOSÉ ANTONIO BARRERA

MENDOZA, ADRIANA RAMÍREZ GONZÁLEZ

Y JOSÉ ANTONIO MENDOZA-MILLÁN

A continuación, se presentan los resultados de un estudio realizado conjuntamente entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Universidad de Occidente, Unidad Guasave. El objetivo de este estudio fue evaluar la posible intrusión salina del acuífero costero, Río Sinaloa. El área pertenece a una de las zonas agrícolas más importantes del país, por lo que hay factores que pueden incrementar la salinidad del suelo debido al uso de fertilizantes y a la aplicación de agua subterránea para riego.

Para determinar la salinidad del agua subterránea dentro de la porción costera del acuífero, se llevaron a cabo muestreos de agua en pozos del municipio de Guasave, Sinaloa, con la intención de conocer los iones mayoritarios para realizar análisis hidrogeoquímicos y conocer la calidad del líquido. Se midió la densidad del agua, en algunos pozos, con la finalidad de alimentar el modelo de Glover y Ghyben-Herzberg, a través del cual, fue posible realizar la simulación de la cuña de intrusión marina.

Los resultados indican que la cuña salina penetra 3 km a partir de la línea de costa, además, que la profundidad es de aproximadamente 30 m.

### Introducción

En México, el mayor consumidor de agua es el sector agrícola, del cual, 34% es de origen subterráneo. Dos de los principales Distritos de Riego (DR) del país se ubican al norte del estado de Sinaloa: el DR063 Guasave, Sin. y el DR075 Río Fuerte, Sin., distritos que consumen más de 50% del agua utilizada para la agricultura en el estado, cuyo origen es agua almacenada en presas y en pozos (CONAGUA 2017).

El acuífero Río Sinaloa es un acuífero costero, en el cual, existe el riesgo de que la intrusión salina incremente la salinidad del agua subterránea en la zona cercana al litoral, si se presentan condiciones de extracción intensiva de agua subterránea que alteren la dirección del flujo de agua (DOF 2016).

### Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la parte noroeste del estado de Sinaloa, en la zona costera del acuífero Río Sinaloa, en el municipio de Guasave, entre los meridianos 108°10'00" y 109°06'50" longitud oeste y los paralelos 25°10'03" al 25°46'19" latitud norte.

La corriente superficial más importante en el municipio de Guasave es el río Sinaloa, este se adentra 70 kilómetros en el área municipal abarcando 17% de su longitud total y desemboca en el Golfo de California.

Según CONAGUA (2015a), el comportamiento hidráulico del acuífero es de tipo libre y el espesor saturado promedio es de 100 m, con una dirección de flujo subterráneo preferencial NE-SO.

### Materiales y métodos

Se llevaron a cabo tres muestreos en tres épocas diferentes durante un año. Los análisis que se realizaron al agua subterránea consistieron en iones mayoritarios (ocho muestras), conductividad eléctrica (CE), pH, sólidos disueltos totales (SDT) y salinidad (SALIN) en campo (11 muestras), así como densidad (diez muestras.) También se tomaron dos muestras de agua de mar.

La concentración de cationes se evaluó con un cromatógrafo de líquidos (Shimadzu, Prominence), equipado con detector de conductividad. La concentración de aniones se realizó por cromatografía iónica (IC). Los bicarbonatos se determinan por titulación potenciométrica. Los datos de campo se obtuvieron con un equipo multiparamétrico (YSI).

Para la obtención de los diferentes tipos de aguas con base en los iones mayoritarios, se utilizó el programa Diagramme, desarrollado por la Universidad de Avignon en Francia (Simler, 2012). En la figura 1, se muestran los puntos de muestreo de agua de pozo.

El modelo de Glover y Ghyben-Herzberg considera la evolución espacial y temporal de la interfase que existe entre el agua marina con el acuífero. Dicho modelo se genera a partir de la diferencia de densidades que existe entre ambos líquidos; de la descarga natural del acuífero hacia el mar por unidad de longitud de costa; y de la conductividad hidráulica (Zhou, 2011). Para su utilización, se diseñó una malla de discretización con una separación entre nodos de 3 km, elegida con la finalidad de obtener en los resultados una resolución apropiada para el área total de estudio, tomando en cuenta la distancia promedio que existe entre los puntos de muestreo.

## Resultados y Discusión

Los iones que estuvieron por arriba del límite permisible fueron sodio (Na) y cloruros (Cl). El sodio sobrepasó el límite en cinco de los ocho pozos muestreados. Dos pozos mostraron concentraciones de cloruros por arriba del límite permisible de la norma.

El diagrama de Piper utilizado, indica que las aguas predominantes son la bicarbonatada sódica, y en menor proporción, la clorurada sódica cálcica. Los pozos con este último tipo de agua, son los pozos con más de 30 m de profundidad. El pozo cuya agua tuvo las menores concentraciones de iones es el más alejado de la línea de costa.

La densidad del agua dulce para las diez muestras obtenidas en la zona de estudio varía entre 997.3 y 999.8 kg/m<sup>3</sup>; para el agua marina fue de 1025 y 1026 kg/m<sup>3</sup>.

El resultado obtenido a partir del modelo tridimensional de Glover y Ghyben-Herzberg muestra que, aproximadamente a 10 metros de profundidad la cuña de intrusión salina entra en contacto con el acuífero, a partir de la línea de costa.

En las figuras 2 y 3 se presenta la cuña de intrusión marina a través del acuífero en tres dimensiones.

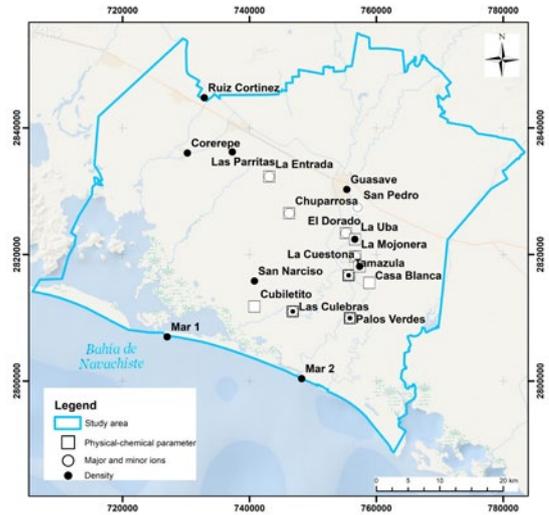


Figura 1. Área de estudio y ubicación de sitios de muestreo

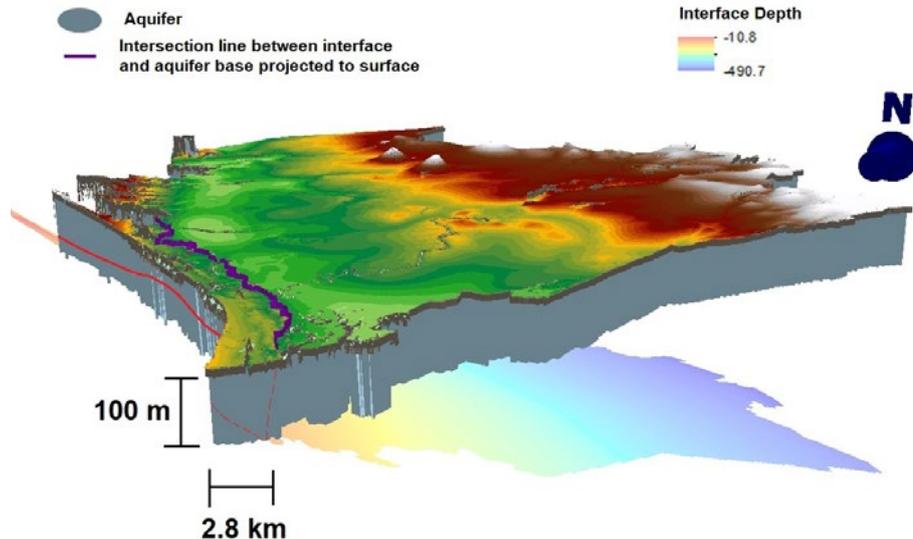


Figura 2. Modelo en tres dimensiones de la cuña de intrusión salina

De acuerdo con los resultados, la intrusión ha afectado al acuífero entre los 10 y 60 metros de profundidad, hasta 3 km en la horizontal aproximadamente, por lo cual, la probabilidad de bombear agua salina (por efectos de la intrusión salina) de los pozos que se encuentran a menos de 10 m de profundidad y más de 3 km de la línea de costa hacia el continente, es baja.

## Conclusiones

Los resultados del modelo de intrusión salina muestran que la cuña salina penetra al acuífero a lo largo de la línea de costa a una profundidad que varía entre 10 y 60 m. El espesor saturado del acuífero reportado por CONAGUA es de 100 m, para dicha profundidad, el avance de la cuña en superficie varía entre 2.5 y 3 km a partir de la línea de costa. A pesar de que los niveles estáticos medidos en los pozos de muestreo no exceden los 10 m de profundidad, se tiene registro de que algunos pozos pertenecientes a la Junta Municipal de Agua tienen niveles hasta más de 30 m, lo cual, puede ampliar el riesgo del avance de la cuña en el caso de que existiera un sobrebombeo.

Los resultados obtenidos indican que la afectación al agua subterránea debido a la intrusión salina es mínima, pero, se observa un riesgo a futuro. |

## Referencias

- Atarés Huerta, Lorena (2011). Determinación de la densidad de un líquido con el método del picnómetro. Artículo docente de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Badillo, J. y Rodríguez, R. (1977). Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tomo I. 3ª Edición. Limusa. México. pp. 53, 56, 97-121, 149-163.
- Barlow P. M. y Reichard E. (2010). Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal*. 18, pp. 247-260.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (1999). Datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Modificado por CONABIO. Esc. 1:1,000,000.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2011). Instrumentación de las redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos San Lorenzo, Culiacán, Sinaloa y Fuerte, en el estado de Sinaloa. Subdirección General Técnica Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Culiacán, Sinaloa.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego Año Agrícola 2013-2014.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Sinaloa (2502), Estado de Sinaloa. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103332/DR\\_2502.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103332/DR_2502.pdf).

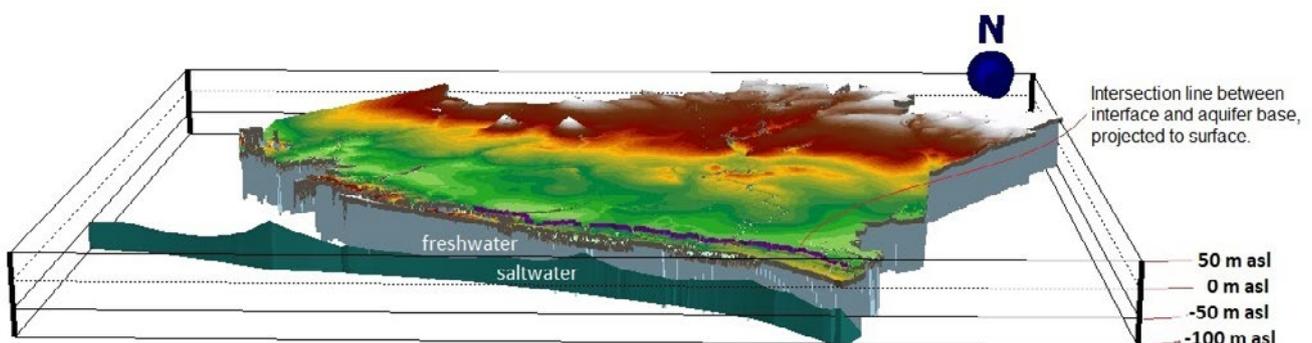
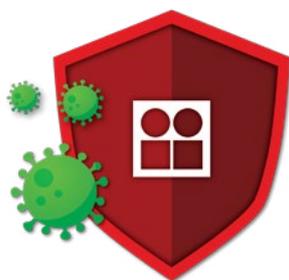


Figura 3. Intersección de la línea de intrusión con el acuífero a lo largo de la línea de costa

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2016). Estadísticas del Agua en México.
- Custodio, Emilio (2010). Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeology Journal* 18, pp. 269-280.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2000). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp. 1-21.
- Gea Serrano, María Magdalena (2014). La correlación y regresión en bachillerato: Análisis de libros de texto y del conocimiento de los futuros profesores. Tesis de Doctorado. Universidad de Granada.
- Llanes-Cárdenas, O.; Norzagaray-Campos, M.; Muñoz-Sevilla, P. y Ruiz-Guerrero, R. (2013). Agua subterránea: alternativa acuícola en el Noroeste de México. *Revista AquaTIC*, n.º. 38 pp. 10-20.
- Mellado Moreno, K. V. (2007). Determinación de plaguicidas organoclorados por cromatografía de gases, en agua subterránea del municipio de Guasave, Sinaloa. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria. Coahuila.
- Monreal, R.; Castillo, J.; Rangel M.; Morales M.; Oroz, L. A. y Valenzuela, H. (2001). La intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora. AIMMG, AC. XXIV Convención Internacional. Acapulco, Guerrero. Oct. 17-20.
- Norzagaray-Campos, M. (2003). Flujo regional en acuíferos, sus causas y efectos en la dispersividad hidrodinámica: un caso de estudio. Tesis doctoral. CINVESTAV-Mérida. Mérida, Yucatán. México. 169 pp.
- Peinado-Guevara, H. J.; Green-Ruiz, C. R.; Herrera-Barrientos, J.; Escobedo-Fuentes, O. A.; Delgado-Rodríguez, O.; Belmonte-Jiménez, S. I. y Ladrón de Guevara, M. A. (2011). Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera. *Hidrobiológica* 2011, 21 (1): 63-76.
- Pujari, P. R. y Soni, A. (2009). Sea water intrusion studies near Kovaya limestone mine, Saurashtra coast, India. *Environmental Monitoring Assessment*. 154 pp. 93-109.
- Reyes Martínez, A. y Quintero Soto, M. L. (2009). Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora. *Revista Digital Universitaria*. Vol. 10 No. 6. ISSN: 1067-6079.
- Rodríguez-Meza, D.; Rodríguez-Figueroa, G.; Sapozhnikov, D.; Vargas-Ramírez, C.; Vallejo-Soto, A.; Verdugo-Quiñonez, G.; Michel-Rubio, A. (2008). Monitoreo de la calidad del agua del acuífero de Guasave, Sinaloa (México). II Coloquio Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo. Retos de la Gestión Ambiental Local en el Marco de la Globalización. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) (2017). Geología de México. Los Mochis, carta G12-9, Esc 1:250,000. Datos vectoriales.
- Simler R (2012). Software Diagrammes. <http://www.lha.univ-avignon.fr/Fichiers/Manuel%20DIAGRAMMES.pdf>.
- Sridhar, R.; Thangaradjou, T.; Senthil, K. y Kannan, L. (2006). Water quality and phytoplankton characteristics in the Palk Bay, Southeast Coast of India. *J. Environ. Biol.*, 27: 561-566.
- Steyl, G. y Dennis, I. (2010). Review of coastal-area aquifers in Africa. *Hydrogeology Journal* 18, pp. 217-225.
- Truque, B. P. A. (2012). Armonización de los estándares de agua potable en las Américas. <https://www.oas.org/DSD/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>.
- Werner, A. (2010). "A review of seawater intrusion and its management in Australia". *Hydrogeology Journal* 18, pp. 281-285.
- Zhou, X. (2011). A method for estimating the fresh water-salt water interface with hydraulic heads in a coastal aquifer and its application. *Geoscience Frontiers* 2(2) 199-203.



Juntos  
prevenimos  
la COVID-19

## INSTALACIÓN DE ESTACIONES IOT PARA EL MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE LA RED DE AGUA EN LA CIUDAD DE GUANAJUATO

LIZETH TORRES<sup>1</sup> Y MARTÍN JIMÉNEZ MAGAÑA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM.

<sup>2</sup> FES ARAGÓN

Un sistema de agua inteligente es uno de los seis ingredientes que conforman una *Smart City*; el resto son sistemas que involucran la gestión de energía, movilidad, edificios, servicios públicos y economía. El objetivo de integrar estos sistemas es conseguir que las ciudades sean más eficientes para mejorar la calidad de vida de sus habitantes<sup>1</sup>. En términos generales, un sistema de agua inteligente maneja un enfoque holístico para administrar este recurso invaluable, así como la infraestructura que rodea su abastecimiento, tratamiento y distribución<sup>2</sup>. Técnicamente, los sistemas de agua inteligentes utilizan sensores capaces de recopilar datos en tiempo real y transmitirlos a la nube, es decir, sensores adecuados para el internet de las cosas (*Internet of Things: IoT*). Estos sensores permiten ejecutar maniobras indispensables para una buena gestión de las redes de distribución de agua, como, por ejemplo, el monitoreo de la calidad y la detección de fugas, que son tareas que se deben realizar considerando que se pierde alrededor de 40% del agua potable en México. Lo anterior, debido a que

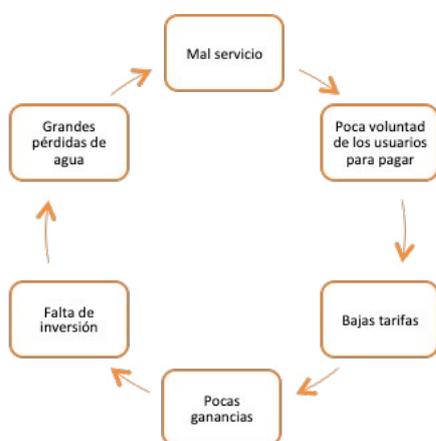


Figura 1. Círculo vicioso de las pérdidas de agua

muchos de los organismos que gestionan el agua han entrado en el círculo vicioso de las pérdidas (ver Figura 1), el cual, sólo se puede romper midiendo y usando las herramientas en las que se apoya la hidroinformática<sup>3</sup>.

En este sentido, con apoyo de CONACyT, el IIUNAM y el Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato (SIMAPAG) emprendieron la implementación del piloto de un sistema de agua inteligente en la ciudad de Guanajuato, que utiliza tecnología IoT para obtener información en tiempo real de los sensores hidráulicos y de calidad ubicados en estaciones IoT.

En el presente contexto, una estación IoT es un espacio físico (por ejemplo, una caja de válvulas) que se compone de tres sistemas: una fuente de alimentación, una matriz de sensores y un dispositivo de telemetría, que envía la información capturada por los sensores a un espacio virtual en la nube: una plataforma *web*.

### Descripción de la red de agua de la ciudad de Guanajuato

De la demanda de agua de la ciudad de Guanajuato, 40% proviene de dos plantas de tratamiento: “Los Filtros” e “Ing. Salvador Yañez Castro”. La primera planta es abastecida por las presas “La Soledad” y “La Esperanza”, mientras que la segunda es abastecida por “Presa de Mata”. Del agua potable restante, 60% proviene de pozos. La red de distribución de agua de la ciudad de Guanajuato tiene una extensión aproximada de 655.382 km y tiene tuberías con diámetros que van de 4” a 16”, de las cuales, 72% es de PVC. La red se divide en 26 macro-sectores, de los cuales, uno se llama “3 Estrellas”, que incluye al sector “Los Alcaldes”: área elegida para la puesta en marcha del piloto de un sistema de agua inteligente. Este sector se abastece por un tanque superficial con un volumen de 1000 m<sup>3</sup>, que a su vez, se abastece de una estación conocida como “Cárcamo Yerbabuena”, que es proveída por agua de los pozos. El trazo del sector se muestra en la Figura 2.

### Descripción del sistema de agua inteligente “Los Alcaldes”

Actualmente, el sistema de agua inteligente “Los Alcaldes” cuenta con dos estaciones IoT. La primera estación está localizada en la entrada del sector, mientras que la segunda se encuentra en el Hospital General de Guanajuato. Se tienen proyectadas dos más: una en una estación de autobuses y otra en un extremo del sector. La primera estación es un espacio subterráneo rectangular con paredes de concreto a la que se accede mediante una escalera marina. La tubería principal,

que distribuye el agua al sector, tiene un diámetro de 3" y atraviesa esta estación. En esta tubería se instaló una válvula reductora de presión (VRP) junto con dos transductores de presión: un transductor aguas arriba y el otro aguas abajo de la VRP. También, se instaló un medidor de gasto aguas abajo de la VRP con el fin de medir la demanda de los usuarios del sector. Adicionalmente, un *bypass* se montó en la tubería principal, en el cual, se colocaron sensores de pH, temperatura y cloro. El objetivo del *bypass* es permitir que los sensores puedan aislarse mientras se ejecutan actividades de mantenimiento sin necesidad de interrumpir el suministro de agua.

La estación fue diseñada para ser autónoma energéticamente, cuenta con un sistema de suministro de energía de origen fotovoltaico con una capacidad de almacenamiento para operar hasta 30 días sin sol. Se muestra una imagen de esta estación en la Figura 3. La estación está equipada con dos dispositivos de telemetría que envían las mediciones tomadas por los sensores hacia una plataforma *web*. Un dispositivo envía las mediciones proporcionadas por los transductores de presión y el otro envía las mediciones proporcionadas por el medidor de gasto, pH, temperatura y cloro. Ambos dispositivos utilizan diferentes protocolos de comunicación para trabajar con los diversos sensores que están conectados a ellos, incluidos los protocolos analógicos y digitales: 4-20 mA, HART, RS-232/485, UART, SPI, I2C. Además, los dispositivos tienen un módulo de comunicación de radiofrecuencia que es compatible con las redes 2G y 3G de cualquier operador de telefonía celular global, lo que permite la comunicación entre los dispositivos y la plataforma *web*, donde se reciben, muestran y almacenan los datos para su análisis.



Figura 3. Estación IoT en la entrada de "Los Alcaldes"

La plataforma *web*, que administra el análisis y el almacenamiento de datos, utiliza los servicios de computación en la nube de Microsoft Azure®, que incluyen herramientas como IoT Hub y Stream Analytics, para manejar los dispositivos de telemetría y las bases de datos de SQL Server, para almacenar la información. La plataforma *web* fue diseñada para ser escalable y robusta, así como para recibir y procesar grandes cantidades de datos. Además, fue concebida para permitir el uso de algoritmos complejos que son esenciales para un sistema de abastecimiento inteligente.

El envío de datos desde ambos dispositivos se realiza cada 10 minutos. Los datos almacenados se pueden descargar en los siguientes archivos de datos .csv, .pdf y .xls; éstos están etiquetados con los nombres de las variables y tienen marcas de fecha y hora asociadas que indican el envío de las mediciones.

La estación del hospital está equipada con un dispositivo de telemetría que transmite la información de un medidor de gasto y un transductor de presión. Su sistema de alimentación está conformado por un banco de baterías que se recarga durante el día con la energía de la radiación solar que logra captar un panel solar. Una imagen de esta estación se muestra en la Fig. 4.

### Usos de la información

El monitoreo en tiempo real de los parámetros hidráulicos, así como los asociados a la calidad del agua, puede permitir a los responsables mejorar el servicio de distribución, reducir las pérdidas de agua y minimizar los costos de manteni-

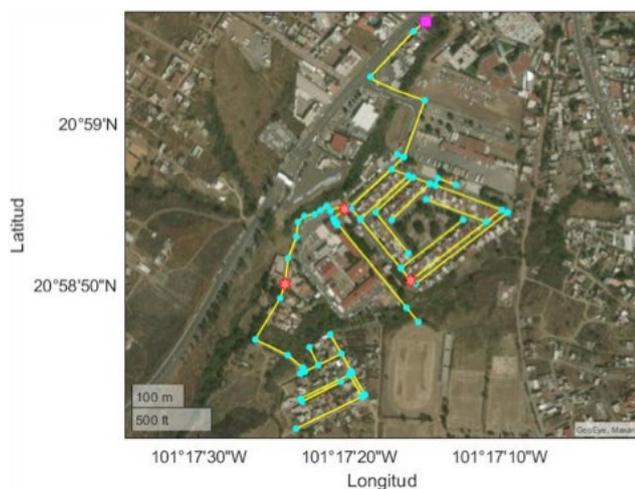


Figura 2. Trazo del sector "Los Alcaldes" realizado en EPANET

## COORDINACIÓN DE ELÉCTRICA Y COMPUTACIÓN



Figura 4. Estación IoT en el Hospital General de Guanajuato

miento aumentando la resiliencia de las redes de distribución. Sin embargo, el monitoreo en tiempo real *per se* no es suficiente para lograr una gestión integral de las redes. Para lograr este objetivo, es necesario utilizar la información en tiempo real como alimento para algoritmos de predicción. En otras palabras, se requiere hidroinformática para articular la información que propicie una distribución eficiente del agua.

Una de las métricas más utilizadas para la detección de fugas en un sector de una red de distribución de agua, que se puede calcular a partir de la información que se captura en las estaciones IoT, es el mínimo nocturno, que es el caudal promedio más bajo durante un período de 24 horas. El mínimo nocturno, generalmente, se obtiene entre las 00:00 y las 4:00, *i.e.*, cuando la mayoría de los tanques se han llenado y los usuarios están dormidos.

En la Figura 5 se muestra el consumo de agua de los usuarios de “Los Alcaldes” durante una semana del mes de julio de 2019. En esta figura se puede apreciar el mínimo nocturno semanal. Muchas otras métricas también se utilizan para

caracterizar el agua, como la demanda promedio, la máxima demanda o la máxima demanda promedio. A partir de estas métricas, se puede formular modelos matemáticos para describir y predecir el comportamiento de la demanda de agua. Estos modelos, además de ayudar en el diagnóstico de fugas, son herramientas clave para proyectar y planear nuevos desarrollos o expansiones, como tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo y capacidad de conducción.

Para complementar un buen servicio de distribución de agua, se debe asegurar que el agua sea potable y apta para el consumo humano, por lo que es necesario medir parámetros físicos, químicos y microbiológicos asociados a su calidad. En este contexto, hay dos tipos de problemas de calidad del agua. El primero es un problema crónico con el origen del agua, los procesos de tratamiento y los errores del operador que afectan la calidad. Este tipo de problema, generalmente, se rectifica en la etapa de tratamiento y puede detectarse mediante métodos analíticos de laboratorio. El segundo tipo de problema proviene de la interrupción intermitente o única de la calidad debido a la intrusión de contaminantes deliberada o accidental. Estos problemas, que podrían provocar impactos catastróficos en la salud humana, no pueden detectarse con métodos convencionales de muestreo y análisis. Los métodos analíticos de laboratorio existentes, especialmente para análisis microbiológicos, no brindan advertencias en tiempo real y son demasiado lentos para el desarrollo de la respuesta operativa en el caso de un evento de falla. A menudo, cuando se obtienen los resultados de laboratorio, ya se ha suministrado el agua a los consumidores.

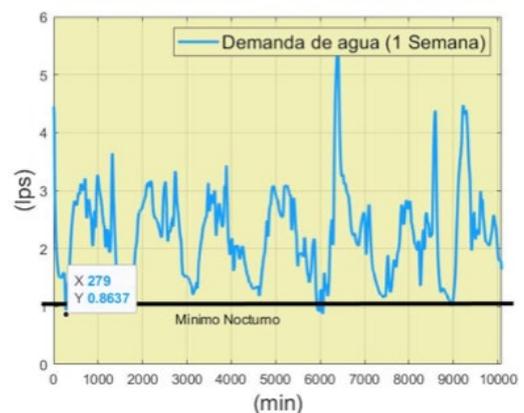


Figura 5. Demanda de agua en una semana de julio de 2019 en “Los Alcaldes”

Por ejemplo, el pH es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua. La Organización Mundial de la Salud recomienda que el pH del agua debe estar entre 6.5 y 9.5, preferiblemente en menos de 8 para una desinfección eficaz con cloro. Si el pH es bajo puede indicar lixiviación y nitrificación, es decir, daños en el sistema de distribución. Si los valores de pH son extremos pueden ser el resultado de derrames accidentales, de la intrusión de contaminantes a través de tuberías rotas o corroídas, de fallas en el tratamiento o debido a la presencia de microorganismos que cambian el pH al producir desechos metabólicos básicos o ácidos.

En conclusión, el monitoreo en línea del pH y otros parámetros asociados a la calidad del agua, son componentes importantes de un sistema de alerta temprana que puede permitir a los gestores identificar rápidamente cualquier problema potencial y aplicar medidas correctivas para proteger al consumidor<sup>4</sup>.

### Agradecimientos

El trabajo que se presenta en este artículo fue financiado parcialmente por SIMAPAG y CONACYT - Atención a Problemas Nacionales, Convocatoria 2017, Proyecto 4730. |

### Referencias

1. Neirotti, P.; De Marco, A.; Cagliano, A. C.; Mangano, G. y Scorrano, F. (2014). Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 38, 25-36.
2. Farah, E. y Shahrour, I. (2017). Leakage detection using smart water system: Combination of water balance and automated minimum night flow. *Water Resources Management*, 31(15), 4821-4833.
3. Makropoulos, C. y Savić, D. A. (2019). Urban hydroinformatics: Past, present and future. *Water*. 11(10), 1959.
4. Banna, M. H.; Imran, S.; Francisque, A.; Najjaran, H.; Sadiq, R.; Rodríguez, M. y Hoorfar, M. (2014). Online drinking water quality monitoring: review on available and emerging technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 44(12), 1370-1421.

# NOTIINGEN

## ¿Conoces NOTIINGEN?

Es el noticiero del Instituto de Ingeniería presentado por Fernanda Cisneros, donde encontrarás la información más relevante del mundo de la ciencia y la tecnología que se desarrolla en la UNAM.

**Encuétralo cada viernes en nuestras redes sociales**



InstitutoIngenieriaUNAM



IIUNAM



IIUNAM



IIUNAM



IINGENUNAM

## APORTACIONES EN EL CLÚSTER DE BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS DE LA UNIDAD ACADÉMICA JURQUILLA

GERMÁN BUITRÓN, IVÁN MORENO,  
JULIÁN CARRILLO, IDANIA VALDEZ,  
ALEJANDRO VARGAS, GUILLERMO QUIJANO,  
KARLA M. MUÑOZ, GLORIA MORENO,  
JAIME PÉREZ, RENÉ CARDEÑA, MIGUEL A. VITAL,  
MARTÍN BARRAGÁN, ÁNGEL A. HERNÁNDEZ

### 1. Introducción

En 2014, la Secretaría de Energía emitió la convocatoria de Sustentabilidad Energética para la conformación del Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio). El CEMIE-Bio se conformó en cinco clústeres. El Instituto de Ingeniería tiene una importante participación en dos de ellos: el Clúster Biocombustibles Gaseosos y el Clúster Biocombustibles Lignocelulósicos para el Sector Transporte. Ambos están conformados por Instituciones de Educación Superior, Centros e Institutos de Investigación y Empresas. En ambos clústeres participa todo el personal de la Unidad Académica Juriquilla, estudiantes de licenciatura, maestría, doctorado y postdoctorado. También en el Clúster Biocombustibles Gaseosos participa personal de la Coordinación de Ingeniería Ambiental.

El Clúster Biocombustibles Gaseosos tiene como objetivo proponer una serie de procedimientos que en conjunto puedan derivar en bioprocesos para la producción de metano y biohidrógeno empleando aguas residuales y residuos. Cabe señalar que, en particular, el estudio de los efluentes vitivinícolas y de suero de leche derivado de la fabricación de quesos, atiende una problemática particular del Estado de Querétaro, donde estas industrias son relevantes. También se estudiaron otros residuos como el bagazo de agave y la fracción orgánica de los residuos sólidos. A continuación, se describe el trabajo de grupo y los aportes en las acciones estratégicas en las que participaron los académicos y estudiantes de la Unidad Académica Juriquilla. Además de los logros científicos y tecnológicos, este proyecto ha tenido un importante impacto en la formación de recursos humanos y la difusión de los resultados de nuestra

Unidad Académica. A la fecha se han graduado a 37 estudiantes (4 de doctorado, 23 de maestría y 10 de licenciatura), publicado 42 artículos (ISI-JCR), y participado con 106 ponencias en congresos nacionales e internacionales.

### 2. Pretratamiento de residuos lignocelulósicos

Un residuo representativo del contexto mexicano es el bagazo de Agave *tequilana* Weber, generado durante la producción de tequila (Valdez-Vazquez *et al.*, 2020). Sin embargo, el uso de estos residuos requiere un pretratamiento que aumente la biodisponibilidad de los azúcares para la producción de biocombustibles como el metano e hidrógeno. Un pretratamiento prometedor es el biológico (Carrillo-Reyes *et al.* 2016). En Juriquilla optimizamos dos pretratamientos biológicos, con microorganismos provenientes del tracto digestivo de los rumiantes y el pretratamiento con consorcios microbianos nativos del residuo. Una comparación mostró que los pretratamientos biológicos tuvieron la ventaja de no producir inhibidores, en comparación con los químicos; además del potencial menor costo en comparación con el uso de enzimas comerciales (Valdez-Vazquez *et al.*, 2020). Debido a estos resultados, se realizó el escalamiento del proceso de hidrólisis con microorganismos ruminales a un volumen de 100 L. La optimización de los pretratamientos biológicos logró aumentar la concentración de sólidos hasta 30%, y reducir el tiempo de retención hidráulico a 1 día. Se realizó un análisis de costos de un sistema a escala real, mediante una simulación en el software *SuperPro Designer*. En éste se prevé la solubilización de biomasa entre el 50 y 68%, con costos de inversión específico hasta 964 USD/ton<sub>residuo</sub>. Así, se demostró el potencial de los pretratamientos biológicos como estrategia eficiente y de bajo costo para la valorización de bagazo de agave.

### 3. Producción de metano

#### 3.1 Residuos sólidos orgánicos

Una de las acciones estratégicas se centró en la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos (RSO). Se usaron residuos de la cafetería del Campus Juriquilla de la UNAM, de un restaurant bufete y residuos orgánicos de la Central de Abasto de Querétaro (Figura 1). Se desarrollaron distintas estrategias para maximizar la cantidad de biogás producido a partir de los residuos como la co-digestión de RSO con lodos de purga de plantas de tratamiento de aguas residuales. Se determinaron las mejores condiciones de operación

que optimizan la producción de metano. También, se realizó el análisis de las comunidades microbianas de los sistemas para determinar los cambios en la dinámica poblacional para correlacionar estos con la operación del biorreactor.

Se realizó la evaluación práctica de una estrategia de control automático (Figura 2). La base de esta propuesta es un modelo matemático que describe de forma aproximada la dinámica del proceso. El control determina el final del tiempo de reacción, por medio de la medición en línea del biogás producido, con lo anterior, se asegura el tiempo de reacción exacto en el que se obtiene la mayor producción de metano.

### 3.2 Efluentes vitivinícolas

Los efluentes vitivinícolas son los residuos líquidos que provienen de la producción del vino, principalmente derivados de la limpieza y lavado de equipos de proceso. A pesar de ser altamente biodegradables, estos residuos son nocivos para el ambiente por su alta concentración que los hace de difícil tratamiento. En México, la disposición de estos residuos no tiene regulaciones claras, por lo que son vertidos de forma incontrolada o usados inapropiadamente como fertilizantes en la agricultura. En Juriquilla, investigamos procesos anaerobios para valorizar estos residuos y convertirlos en energía en forma de metano e hidrógeno. En lo referente al metano,



Figura 2. Sistema empleado para la generación de metano a partir de residuos sólidos orgánicos



Figura 1. Clasificación de residuos orgánicos de la Central de Abasto de Querétaro

demostramos que era mucho más efectivo dividir el proceso en dos etapas (Figura 3) (Buitrón *et al.*, 2019). En el primer biorreactor, un grupo de microorganismos transforma (hidroliza) los contaminantes complejos en sustancias simples. En el segundo biorreactor, los microorganismos transforman las sustancias procedentes del primer biorreactor (ácidos grasos volátiles) en biogás. Con esta estrategia, logramos producir hasta 45 litros de metano por cada litro de residuos y remover entre 90 y 95% de los contaminantes orgánicos (Vital-Jácome *et al.*, 2020). Una vez demostrado lo anterior, probamos que operando el segundo biorreactor se trabaja a 55 °C (condiciones termofílicas), se genera hasta 30% más metano con el mismo proceso, transformando los contaminantes removidos hasta con 99% de eficiencia. El siguiente paso consistirá en investigar otras maneras de aumentar la producción de metano, así como generar otros productos de valor agregado a partir de estos residuos.

### 3.3 Hidrolizados de bagazo de agave

Con el objetivo de revalorizar este residuo lignocelulósico, se evaluaron distintas estrategias para incrementar la generación de metano a partir de éste sustrato. Se utilizaron hidrolizados de pretratamiento con microorganismos ruminales. Se establecieron las condiciones de proceso (temperatura, tiempo de retención hidráulica, alcalinidad) que maximizan la producción biogás. Dicho proceso, fue asistido por una estrategia de alimentación controlada que permitió incrementar aún más la productividad (hasta 35% más con respecto a la condición basal) y permitió una producción estable de metano en mesofilia, incluso a altas cargas orgánicas (16.8 g DQO/L/d).

## 4. Producción de hidrógeno

### 4.1 Efluentes vitivinícolas

Debido al contenido de materia biodegradable como carbohidratos, los efluentes vitivinícolas, tienen potencial para la generación fermentativa de hidrógeno ( $H_2$ ). Además, al acoplar la producción de hidrógeno y metano, se puede recuperar energía en un sistema en dos etapas, hasta 7.15 kJ/gDQO (Carrillo-Reyes *et al.*, 2019). En esta acción estratégica se optimizó la producción continua de  $H_2$ . Se evaluaron distintos sistemas a escala laboratorio (Figura 4), basado en gránulos y biopelículas, con el fin de identificar el mejor sistema capaz

de tener una alta productividad de  $H_2$  y disminuir el efecto de compuestos inhibitorios presentes en los efluentes. El sistema de producción basado en gránulos logró una productividad de 1.5 L  $H_2$ /L-d, donde la recirculación de biogás favoreció la transferencia de masa disminuyendo el consumo del  $H_2$  por homoacetogénesis (Buitrón *et al.*, 2020). Posteriormente se comparó un sistema granular convencional y un filtro percolador, en donde el filtro percolador mejoró la productividad hasta 3.5 L  $H_2$ /L-d, atribuido a la rápida liberación del biogás de la fase acuosa, evitando su consumo. Debido al éxito del sistema percolador, este se escaló a un sistema piloto de 100 L (Figura 5). Finalmente se aplicó una estrategia de optimización en línea. Dicha estrategia optimizó el tiempo de retención hidráulica, incrementando la productividad a 4.3 L  $H_2$ /L-d.

### 4.2 Hidrolizados de bagazo de agave

Se desarrolló una estrategia de control basada en choques de carga orgánica, para mejorar la productividad de  $H_2$  usando dos residuos agroindustriales: hidrolizado ácido de bagazo de agave y suero de leche. Durante el desarrollo de la estrategia se evaluó el efecto de la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica (TRH) sobre la producción de  $H_2$  por fermentación oscura. En el estudio con bagazo de agave primero se determinó el efecto de los inhibidores (furfurales) en la fermentación (Muñoz-Páez *et al.*, 2019, 2020), y posteriormente, se realizó la producción en continuo de hidrógeno.

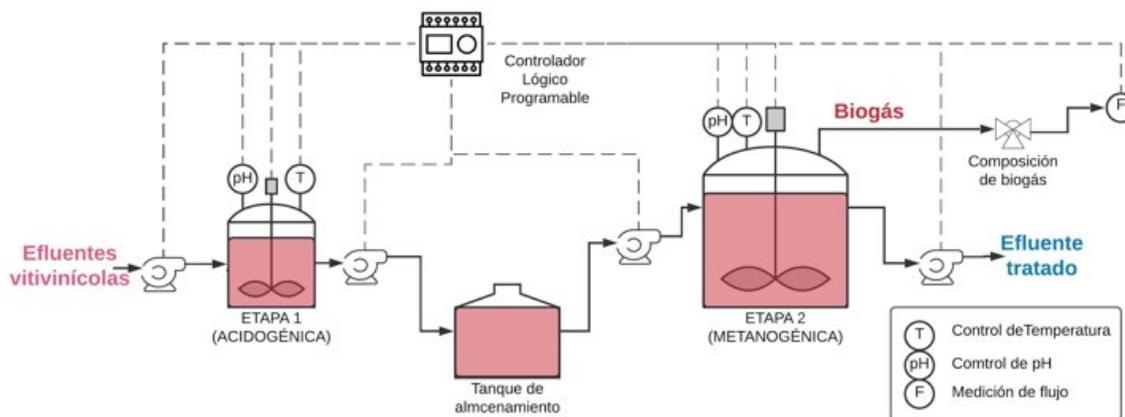


Figura 3. Proceso en dos etapas para generar biogás a partir de efluentes altamente concentrados en materia orgánica

### 4.3. Suero de leche

Se estudió el suero ácido de leche residual como sustrato. Se utilizó un reactor con biomasa granular adaptada a la producción de hidrógeno. Se obtuvieron productividades máximas de  $7.8 \text{ LH}_2/\text{L-d}$ , de las más altas reportadas hasta ahora. Finalmente, se operó el sistema con una estrategia basada en una ley de control retroalimentado en la que se alterna entre dos TRH de forma oportuna (Ramírez-Carmona *et al.* 2018). La aplicación de la estrategia de operación permitió el incremento de la productividad de  $\text{H}_2$ .

### 4.4 Fracción orgánica de residuos sólidos

Se desarrolló un sistema eficiente de producción de hidrógeno a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos (FORSU). Se diseñaron y construyeron reactores discontinuos secuenciales utilizando residuos de restaurantes, una cafetería y la central de abastos de la Ciudad de Santiago de Querétaro. Se evaluaron parámetros operacionales en los sistemas en continuo y discontinuo con el objetivo de determinar los valores que maximizaron la producción de hidrógeno. Se diseñó e implementó una estrategia de control para maximizar la producción de hidrógeno. A partir de los datos obtenidos se validó experimentalmente el funcionamiento adecuado del reactor. Posteriormente, se desarrolló, implementó y validó una estrategia de control para un proceso continuo acoplado para la producción de hidrógeno y metano.

El sistema en dos fases permitió aprovechar el máximo potencial de la FORSU como sustrato para la producción de hidrógeno y metano debido a la hidrólisis que ocurre en el primer reactor. La determinación de las dinámicas microbianas permitió una mejor comprensión de los procesos metabólicos que intervienen en el proceso.

### 4.5 Sistemas bioelectroquímicos

Las celdas electroquímicas microbinas (CEM) son sistemas que emplean microorganismos electroactivos que crecen sobre la superficie de uno o ambos electrodos para el aprovechamiento de los electrones que pueden estar presentes en la materia orgánica. Se determinaron las condiciones operacionales y arquitectura de reactor que permitieran maximizar la producción de  $\text{H}_2$ . Se estudiaron CEM de dos cámaras (Figura 6). Se determinó que el  $\text{H}_2$  se genera con una pureza cercana a 100%. Se desarrolló una estrategia de arranque que permitió



Figura 4. Reactores piloto de laboratorios instrumentados para la producción de hidrógeno



Figura 5. Reactor piloto de 100 L operado como filtro percolador para la producción continua de  $\text{H}_2$

obtener biopelículas electroactivas robustas que aumentaron la generación de hidrógeno. Al fijar el potencial anódico se brindó estabilidad a los microorganismos electroactivos, así como una mayor abundancia de microorganismos del género *Geobacter*. Se utilizaron efluentes acidogénicos provenientes de la fermentación de residuos orgánicos como sustrato. Se encontró que los ácidos grasos volátiles favorecen altos desempeños de producción de hidrógeno. Las productividades máximas obtenidas alcanzaron 3.5 L H<sub>2</sub>/L-d y rendimientos superiores a los 900 mL H<sub>2</sub>/g DQO. Se diseñó y operó un reactor semi-piloto automatizado empleando las mejores condiciones operacionales determinadas durante el proyecto.

## 5. Instrumentación y control de procesos

En casi todos los procesos estudiados, una parte importante ha sido integrar una instrumentación adecuada para posteriormente probar diferentes algoritmos de control retroalimentado. Con el fin de que los sistemas fueran escalables del laboratorio al piloto, se decidió emplear controladores lógicos programables (PLC) con una interfaz humano-máquina (HMI) amigable con el usuario usando una pantalla táctil. Así, dicho sistema no sólo sirvió para automatizar la operación de bombas y hacer regulación estándar de algunas variables de proceso como el pH o la temperatura, sino también, para proporcionar información en línea al usuario a través de gráficos o *displays*. También, logró concentrar y organizar los datos de proceso en un repositorio accesible remotamente.

Con base en los datos de proceso, se propusieron modelos matemáticos de la dinámica de los procesos anaerobios estudiados, y con base en un análisis detallado de ellos, se diseñaron algoritmos de control retroalimentado que inicialmente fueron validados mediante simulaciones numéricas. Posteriormente, fueron simplificados para ser implementados en el PLC y probados experimentalmente.

En particular, tanto para la producción de hidrógeno como para la producción de metano, se probó una estrategia de control novedosa. Ésta, alterna entre dos valores de tiempo de retención hidráulica, alimentando choques de carga orgánica por tiempos controlados con base en una medición en línea de la productividad del biogás generado. El controlador decide cuándo y de qué duración son estos choques, así como la duración de la operación con los tiempos de retención antes de aplicar otro choque. La productividad de biogás ha sido mejorada significativamente en cada sistema donde fue probado, sin afectar la estabilidad del proceso (Figura 7).

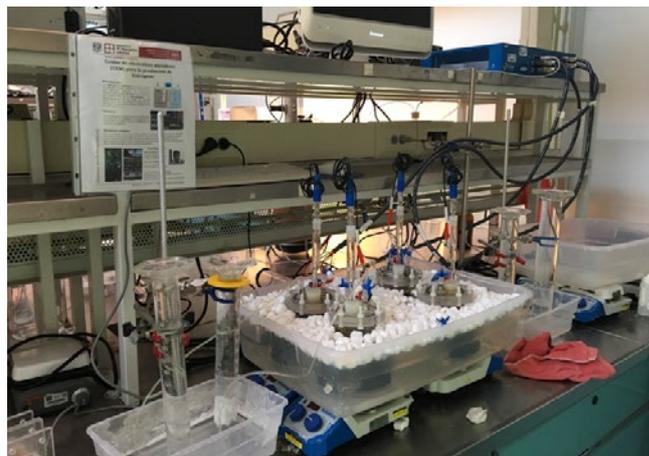


Figura 6. Celdas electroquímicas microbianas

## 6. Post-tratamiento y acondicionamiento de corrientes gaseosas

Esta acción estratégica tuvo como objetivo el acondicionamiento de los biocombustibles gaseosos para ser utilizados en sistemas de aprovechamiento energético, tales como motores de ciclo combinado para la producción de energía térmica y eléctrica. Los contaminantes objetivo más importantes por su ocurrencia y concentración fueron el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el CO<sub>2</sub> y los metil siloxanos volátiles (MSV). Se desarrollaron tecnologías innovadoras para la remoción completa de H<sub>2</sub>S (Quijano *et al.*, 2018). Asimismo, se desarrolló un marco teórico que permite estimar de forma precisa la concentración de H<sub>2</sub>S en biogás a partir de datos de contenido de azufre en sustratos complejos, tales como suero de leche, efluentes vitivinícolas y la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

La remoción de CO<sub>2</sub> en biocombustibles gaseosos se estudió en sistemas microalga-bacteria. Se desarrolló una plataforma teórica y experimental para la caracterización cinética a los cultivos algales con el fin de determinar las tasas máximas de consumo de CO<sub>2</sub> y producción de O<sub>2</sub> bajo diversas condiciones de operación (Vital-Jácome *et al.*, 2020). También, se evaluó el potencial de efluentes residuales para el crecimiento de los sistemas microalga-bacteria enfocados a la remoción de CO<sub>2</sub>.

En el caso de los MSV, los esfuerzos experimentales se enfocaron al desarrollo de una plataforma analítica para su cuantificación. Se desarrolló e implementó un sistema de análisis de MSV, siendo el primer centro de investigación del país con esta capacidad analítica. |

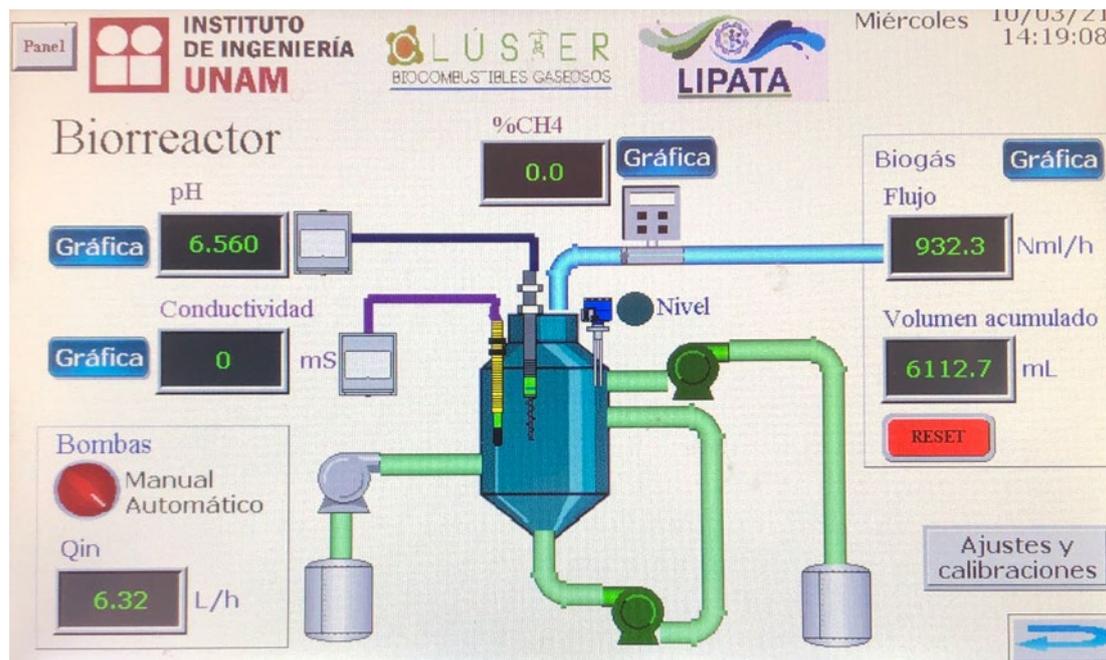


Figura 7. HMI del PLC empleado para un biorreactor

## Referencias

- Buitrón, G.; Martínez-Valdez, F. J.; Ojeda, F. (2019). Biogas production from a highly organic loaded winery effluent through a two-stage process. *BioEnergy Research*, 12 (3), 714–721.
- Buitrón, G.; Muñoz-Páez, K. M.; Quijano, G.; Carrillo-Reyes, J.; Albarrán-Contreras, B. A. (2020). Biohydrogen production from winery effluents: control of the homoacetogenesis through the headspace gas recirculation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 95, 544–552.
- Carrillo-Reyes, J.; Albarrán-Contreras, B. A.; Buitrón, G. (2019). Influence of Added Nutrients and Substrate Concentration in Biohydrogen Production from Winery Wastewaters Coupled to Methane Production. *Appl Biochem Biotechnol* 187, 140–151.
- Carrillo-Reyes, J.; Barragán-Trinidad, M. & Buitrón, G. (2016). Biological pretreatments of microalgal biomass for gaseous biofuel production and the potential use of rumen microorganisms: A review. *Algal research*, 18, 341-351.
- Muñoz-Páez, K. M.; Alvarado-Michi, E. L.; Buitrón, G.; Valdez-Vazquez, I. (2019). Distinct effects of furfural, hydroxymethylfurfural and its mixtures on dark fermentation hydrogen production and microbial structure of a mixed culture. *Int J Hydrogen Energy* 2019 44(4): 2289-2297.
- Muñoz-Páez, K. M.; Alvarado-Michi, E. L.; Moreno-Andrade, I.; Buitrón, G.; Valdez-Vazquez, I. Comparison of suspended and granular cell anaerobic bioreactors for hydrogen production from acid agave bagasse hydrolyzates. *Int J Hydrogen Energy* 2020 45(1): 275-285
- Ramírez-Carmona, U.; Moreno, J. A.; Vargas, A. (2018, July). Fast Extremum Seeking for Bioreactors using a Variable Structure Control Approach. In 2018 15<sup>th</sup> International Workshop on Variable Structure Systems (VSS) (pp. 337-342). IEEE
- Quijano, G.; Figueroa-González, I.; Buitrón, G. (2018). Fully aerobic two-step desulfurization process for purification of highly H<sub>2</sub>S-laden biogas. *J Chem Technol Biotechnol* 2018; 93:3553–61.
- Valdez-Vazquez, I.; Alatríste-Mondragón, F.; Arreola-Vargas, J.; Buitrón, G.; Carrillo-Reyes, J.; León-Becerril, E. y Weber, B. (2020). A comparison of biological, enzymatic, chemical and hydrothermal pretreatments for producing biomethane from Agave bagasse. *Industrial Crops and Products*, 145, 112160.
- Vital-Jacome, M.; Cazares-Granillo, M.; Carrillo-Reyes, J. y Buitrón, G. (2020). Characterization and anaerobic digestion of highly concentrated Mexican wine by-products and effluents. *Water Science and Technology*, 81(1), 190-198.
- Vital-Jácóme, M.; Díaz-Zamorano, A. L.; Cuautle-Marín, M.; Moreno, G.; Buitrón, G.; Muñoz, R. *et al.* (2020). Microalgal-bacterial aggregates with flue gas supply as a platform for the treatment of anaerobic digestion centrate. *J Chem Technol Biotechnol*, 95, 289–96.

## EVALUACIÓN MULTIPELIGRO DE LA CONFIABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE TURBINAS EÓLICAS ANTE EVENTOS EXTREMOS

JESÚS OSVALDO MARTÍN DEL CAMPO PRECIADO  
Y ADRIÁN POZOS ESTRADA

La energía eólica ha experimentado grandes avances gracias a la investigación científica reciente, lo que ha permitido el desarrollo y construcción de turbinas eólicas de mayor tamaño y eficiencia. Esto ha llevado a que la capacidad total instalada mediante fuentes eólicas haya incrementado significativamente en las últimas décadas. Solamente de 2011 a 2017, la capacidad energética mediante fuentes eólicas instalada mundialmente creció en un orden cercano a 2.25 veces, de acuerdo con cifras de la Agencia Internacional de Energía (IEA).

Indiscutiblemente, la energía eólica actualmente juega un rol importante como una de las principales fuentes energéticas. En términos de las llamadas energías renovables, la eólica es la principal fuente de generación energética mediante recursos no hidro-eléctricos. La incursión de turbinas eólicas en sitios con riesgos meteorológicos y naturales de distinta magnitud, tanto de estructuras para turbinas costa-afuera como de turbinas en tierra, es tal, que se han abierto paso en sitios donde los riesgos ante fenómenos naturales como ciclones tropicales y sismos tienen mayor probabilidad de ocurrencia.

### El viento en México

México cuenta con un gran potencial para el aprovechamiento de las energías renovables. De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Limpias, la energía eólica figura dentro de las de mayor contribución con un potencial de aprovechamiento que cuenta con sustento técnico y económico.

Por otra parte, México se ubica en una región que es susceptible al paso de los huracanes, así como también gran parte de su territorio tiene peligro sísmico considerable. Esto representa un contexto peculiar para los parques eólicos, ya que,

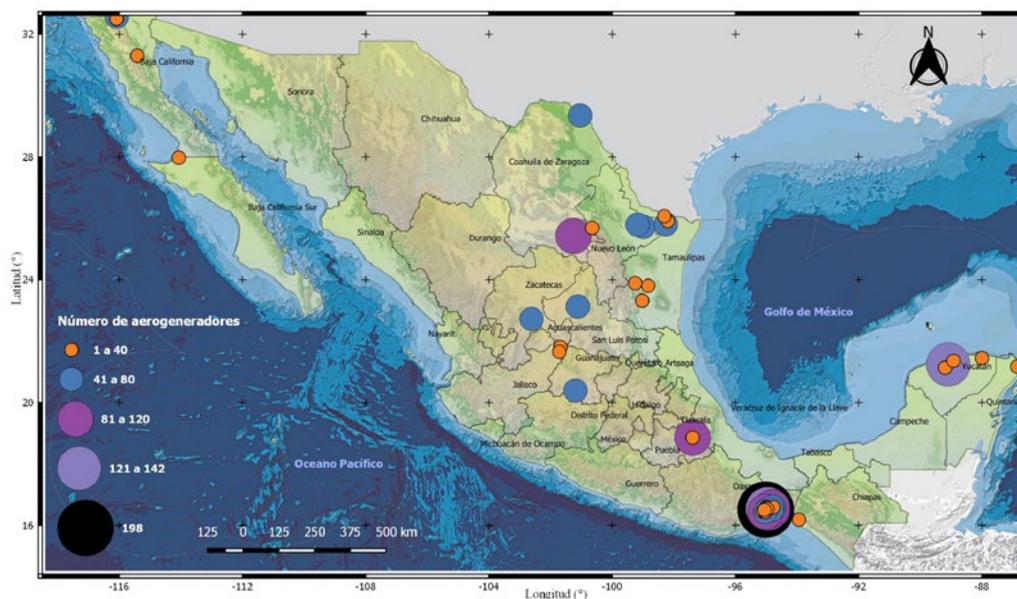


Figura 1. Distribución de los parques eólicos en México

hasta ahora, gran parte de la capacidad energética eólica instalada en México se encuentra en el estado de Oaxaca (Figura 1), el cual sufre de constante actividad sísmica, al mismo tiempo, se localiza en una región donde el paso de ciclones tropicales es muy probable. Por ejemplo, solamente en 2017, un sismo con magnitud 8.2 tuvo epicentro cerca de las costas de Oaxaca y, el mismo año, las tormentas tropicales Calvin y Beatriz tocaron tierra en las costas del estado. Estas condiciones motivan la evaluación de la respuesta y comportamiento estructurales de turbinas eólicas ante la acción de estos eventos.

### Estudio de una turbina eólica ante sismo y viento simultáneos

Se evaluó la respuesta estructural de una turbina eólica de gran capacidad al somerla a acciones semejantes a las que deben ser sometidas las turbinas instaladas en parques eólicos mexicanos (Figura 1). En el caso de México, cerca de 60% de la capacidad energética total se encuentra instalada en el estado de Oaxaca, por ello, se simularon conjuntos de registros sísmicos cuyas características espectrales fuesen concordantes con los espectros establecidos en el Manual de Obras Civiles de CFE (2015) para esta región. También, se realizaron simulaciones de velocidades de viento, de acuerdo con criterios semejantes a los establecidos en el mismo manual. La intención de estos estudios fue la de evaluar y comparar la probabilidad de falla de una estructura representativa ante acciones de sismo y viento, individual o simultáneamente.

La probabilidad de falla de un sistema estructural puede ser asociada a alguna medida de intensidad de la acción que actúa sobre éste, en el contexto de ingeniería estructural, se le suele nombrar *fragilidad*. Así, las expresiones matemáticas que describen la relación de la intensidad de la acción con la probabilidad de que este sistema alcance un estado límite determinado son llamadas *funciones de fragilidad*. La relevancia de conocer la fragilidad de un sistema estructural radica en varios puntos: por ejemplo, esta puede ser una herramienta útil en los análisis de *vulnerabilidad* estructural subsecuentes, los cuales estiman las pérdidas económicas esperadas debido a fallas estructurales o la interrupción de la operación de la estructura, según la probabilidad de ocurrencia del fenómeno en cuestión.

La turbina modelada tiene una altura al eje del rotor de 90 m, y su estructura de soporte es de sección cónica, variando su diámetro exterior desde 6 m en la base, hasta 3.87 m en el extremo superior de la torre. Mediante modelos de elemento

finito (Figura 2), se estudió el comportamiento inelástico de la estructura, para así determinar los umbrales de daño que serían empleados en los análisis de fragilidad subsecuentes. Un modelo simplificado de la estructura permitió desarrollar un número suficiente de análisis en el dominio del tiempo, para así evaluar su respuesta en un intervalo amplio de intensidades para la acción de sismo y viento, incluso combinados.

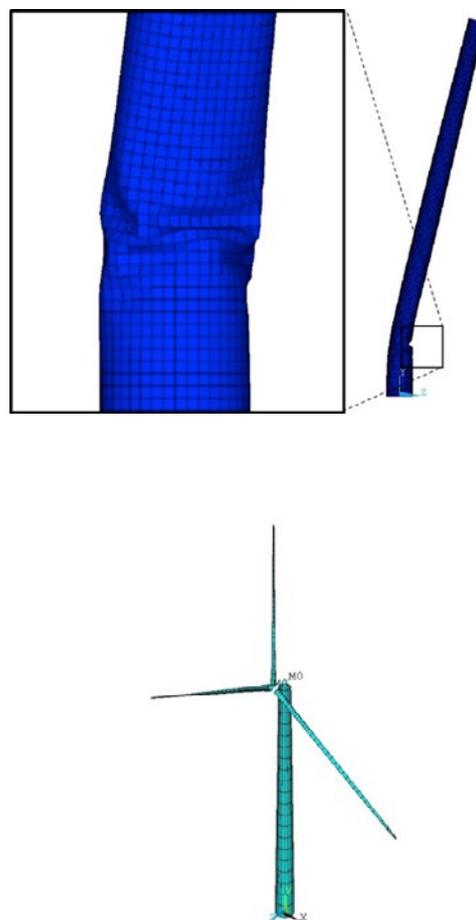


Figura 2. Modelo para el estudio de la capacidad última a flexión de la torre de un aerogenerador, y modelo simplificado para los análisis dinámicos

Un modelo matemático que describiese a la respuesta estructural como función de las intensidades fue desarrollado, y definiendo a la distribución de probabilidad que mejor describe a la respuesta, se puede estimar qué tan probable es que el sistema estructural rebase el estado límite asociado a un nivel de desempeño determinado. Es decir, mientras más cercana a 1 sea la fragilidad en una intensidad dada, mayor es la probabilidad de que la estructura alcance dicho estado límite. La Figura 3 ilustra algunos de estos resultados.

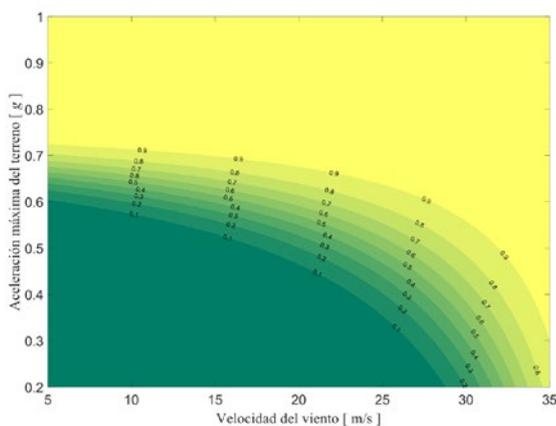


Figura 3. Contornos de fragilidad para el estado límite último de la torre

## Mejora de la confiabilidad mediante masas sólidas resonantes

Actualmente, los sistemas de masas resonantes (o masas sintonizadas) son cotidianamente empleados en estructuras convencionales para reducir la vibración inducida por diversas fuentes, como pueden ser la operación de maquinaria, la acción prolongada del viento, incluso, el propio uso de la estructura. Estos sistemas representan una solución viable en estructuras donde las condiciones de servicio gobiernan el diseño, y consisten en conectar a la estructura un sistema secundario compuesto por una masa, por un resorte con rigidez tal, que la frecuencia fundamental del sistema secundario se acerque a la frecuencia del modo de vibrar que se busca controlar en la estructura, y por un amortiguador.

Las masas sólidas sintonizadas (TMDs por las siglas de su nombre en inglés) también suelen ser incluidas en diversos elementos de las turbinas eólicas con la intención de aminorar la respuesta de dicho elemento cuando la turbina se encuentra en operación, y así, prolongar su vida útil ante el daño por fatiga.

Además, el uso de TMDs también, puede representar beneficios ante eventos menos habituales para el aerogenerador, como sismos fuertes o huracanes.

Los modelos de tres turbinas eólicas representativas de las colocadas en parques eólicos de México fueron trazados en elemento finito. Estos modelos fueron analizados ante los efectos de aceleraciones sísmicas registradas en estaciones cercanas a la costa del Pacífico mexicano, cerca de la zona de subducción; así como a velocidades de viento simuladas de acuerdo con modelos basados en estadísticas de ciclones tropicales.

Para cada una de las turbinas eólicas hipotéticas se obtuvieron los parámetros óptimos del sistema de masa sintonizada que se les colocaría, y la evaluación de la respuesta estructural ante la acción de sismo y viento se llevó a cabo para cada una de ellas, con y sin TMDs. Los resultados indican que, debido a que las turbinas eólicas analizadas son estructuras con periodos de vibración muy largos, estas son afectadas más críticamente por la acción del viento que por sismos (para las características de las turbinas analizadas). Además, una reducción considerable en la probabilidad de falla puede alcanzarse si a las estructuras se les colocan sistemas de masas sólidas sintonizadas. Esta mejora es más notoria en intervalos determinados de velocidades de viento (Figura 4), los cuales se pueden identificar fácilmente comparando la fragilidad evaluada en los dos casos analizados.

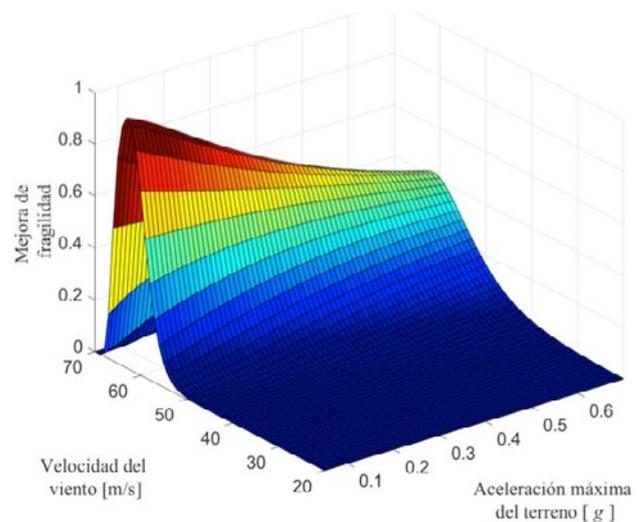


Figura 4. Mejora de la fragilidad para la torre de una turbina de 1 MW mediante el uso de una masa sólida sintonizada, considerando la acción simultánea de sismo y viento

## REUNION INFORMATIVA ANUAL IIUNAM

Con el fin de mostrar algunas de las investigaciones que se están desarrollando en el Instituto de Ingeniería, del 2 al 4 de febrero se llevó a cabo la Reunión Informativa Anual (RIA), donde se presentaron un total de 30 trabajos. De las 17 a las 19 h de manera virtual, durante estos tres días, los académicos del Instituto de Ingeniería mostraron el avance de sus investigaciones en todas las áreas de las ingenierías que en el IIUNAM se cultivan.

El primer día se habló de Materiales adsorbentes de CO<sub>2</sub> a partir de subproductos industriales; la Medición de propiedades térmicas de los suelos nacionales para el diseño y construcción de estructuras termoactivas en México; el Desarrollo de termómetros IR para producción industrial; la Detección de SARS-CoV-2 en aguas de drenaje; la Cinética de la producción de metano a partir de los productos de la fermentación anaerobia; la Participación del Instituto de Ingeniería en el Proyecto del Tren Interurbano México-Toluca; los Biosensores y dispositivos bioelectrónicos: Impacto del desarrollo tecnológico frente a la COVID-19; la Aplicaciones del monitoreo del acuífero de Yucatán a través de un Observatorio Costero: Estudio de la inversión de flujo en manantiales costeros; las Experiencias adquiridas en las normativas para bolsas biodegradables y compostables; la Asesoría geotécnica para la mitigación de riesgos; y el Desarrollo de la infraestructura en la Ciudad de México.

El segundo día presentaron los resultados de los estudios sobre el Modelado conjugado del secado de alimentos por convección forzada; el Tratamiento de aguas residuales de la industria metalúrgica; el Modelo didáctico escala piloto para el tratamiento de aguas residuales con microalgas y captura de CO<sub>2</sub> y flotación con ozono (ATZINTLI); la colaboración académica en material de geotecnia y estructuras durante el desarrollo de la ingeniería básica del tren Maya; el Análisis de estabilidad de suspensiones de nanopartículas de plata por voltametría cíclica y espectroscopia óptica; el Uso de simulación numérica para estudiar álabes oscilantes para extracción de energía de corrientes; efectos de un esquema de control en lazo cerrado; la Producción de metano e hidrógeno con efluentes vitivinícolas y optimización con ingeniería de flujos metabólicos; la Caracterización de las mamposterías de los templos conventuales del estado de Morelos; el Uso eficiente de la energía en agua, electromovilidad y residuos urbanos; la Problemática de las inundaciones en la cuenca del río Grijalva, Parte I.

Finalmente, el último día se abordaron el Plan maestro para la gestión del agua subterránea del acuífero de la Ciudad

de México; la Evaluación del comportamiento estructural de aerogeneradores ante los efectos de viento y sismo; el Diagnóstico y recomendaciones de logística de desastres para respuesta a sismos en la Zona Metropolitana del Valle de México; el Impacto del desarrollo de puertos pesqueros en la línea de costa del norte de la Península de Yucatán; el Estudio del funcionamiento hidráulico de la segunda línea de conducción de Pb5 a T05 del sistema Cutzamala; la Selección de los edificios de vivienda en la Ciudad de México con más riesgo sísmico; la Inteligencia artificial y realidad virtual para enfrentar el riesgo sobre la infraestructura enterrada: hundimientos diferenciales y agrietamiento en la CDMX; el Sistema portátil para la adquisición de datos sísmicos en disposición concéntrica; la Evaluación teórica y experimental de estado de carga y de salud de baterías de iones de litio; y la Problemática de las inundaciones en la cuenca del río Grijalva. Estudios realizados en la coordinación de hidráulica – Parte II.

Estos trabajos son sólo una muestra de los estudios que se realizan en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. |



## PRIMER INFORME DE ACTIVIDADES DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

La Dra. Rosa María Ramírez Zamora, presentó su primer informe de actividades el pasado 5 de febrero. Recordó que 2020 fue un año en el que dejamos en el camino a varios miembros de nuestra comunidad, a sus familias les mandó su solidaridad. A pesar de las difíciles condiciones en las que laboramos -dijo-, pudimos sacar adelante el trabajo de manera sobresaliente. Se llevaron a cabo 120 convenios. Entre los proyectos más destacados se encuentra el Deshidratador geotérmico de alimentos; los estudios ambientales del Nuevo aeropuerto Felipe Ángeles; el desarrollo de capacidades nacionales para aumentar la resiliencia sísmica de edificios de concreto y mampostería; la asesoría geotécnica para la mitigación de riesgos; el desarrollo de infraestructura en la CDMX; los Planes maestros de agua potable 2020-2029; el de drenaje, tratamiento, reúso y comportamiento de las lluvias; el monitoreo del Sars-Cov2, así como el de la resistencia y resiliencia física de playas naturales ante perturbaciones.

Felicité a los Drs. Adalberto Noyola Robles y Jaime Alberto Moreno Pérez, quienes se hicieron acreedores al Premio Universidad Nacional 2020 en las áreas: Innovación Tecnológica y Diseño Industrial, así como en Ciencias Exactas, respectivamente.

Asimismo, dijo estar muy contenta por que la Dra. Idania Valdez Vázquez también fue galardonada con la Distinción de Jóvenes Académicos en Innovación Tecnológica y Diseño Industrial que otorga la Universidad Nacional Autónoma de México.



Además, otros cinco miembros del personal académico recibieron reconocimiento por sus investigaciones, ellos son: Julián Carrillo Reyes, quien obtuvo el Premio Carlos Casas Campillo 2020, que otorga la Sociedad de Biotecnología y Bioingeniería junto con la empresa Yakult; Roberto Giovanni Ramírez, ganador del Segundo Lugar a la Mejor Solución Tecnológica en el Área: Bienestar y salud, que otorga la Academia de Ingeniería de México AC; Miguel Rodríguez González junto con los estudiantes Rodrigo Rojas y Roxana Reyna, obtuvieron el Primer lugar en el certamen del Programa para el fomento al patentamiento y la Innovación (PROFOPI), y Judith Ramos, quien recibió el Premio Sor Juana Inés de la Cruz que otorga la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por otra parte, -mencionó- que el personal académico del IIUNAM incrementó la publicación en revistas indizadas alcanzando 2.45% y 2.03% en revistas JCR. Durante 2020 se sometieron nueve solicitudes de patentes y 4 patentes fueron otorgadas.

Se crearon los Comités de: 1) Ética en Investigación y Docencia, integrado por Norma Patricia López Acosta, Flor Lizeth Torres Ortiz, William Vicente Rodríguez, Judith Ramos, Margarita Cisneros y Juan José Pérez Gavilán; 2) el de Igualdad de Género donde participan María Elena Lárraga, José Alberto Rocha, Sonia Briceño, María Sarai Rojas y Javier Bautista; 3) en el Comité para atender la Pandemia está Rosa María Flores Serrano y 4) el Comité de Vinculación Universitaria, como titular está José Luis Fernández Zayas, con Roberto López como suplente.

Este año -afirmó Rosa María Ramírez- en que estoy rindiendo mi primer informe de actividades, es un año especial, pues el Instituto de Ingeniería cumple 65 años de su creación, a pesar de las condiciones en las que nos encontramos trabajando, hemos alcanzado logros importantes; el resultado de nuestro trabajo, como ya lo había mencionado, es positivo.

Además, quiero felicitar a toda la comunidad del Instituto, especialmente, a los miembros de la Comisión Dictaminadora, PRIDE y al Consejo Interno por su importante colaboración.

Finalmente, les informo que hemos elaborado un calendario digital con motivo de los 65 años de nuestro Instituto, donde se muestran las etapas por las que ha ido pasando nuestra dependencia, éste se les hará llegar vía correo electrónico. |

## RECONOCIMIENTO

### SOR JUANA INÉS DE LA CRUZ 2021

Felicitemos calurosamente a Sonia Rosa Briceño Viloria, quien recibió el Reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz 2021, que otorga nuestra máxima casa de estudios a mujeres que destacan por su trayectoria y aportes en los ámbitos de la docencia, la investigación y la difusión de la cultura.

Durante la ceremonia que tuvo lugar de manera virtual, Diana Tamara Martínez Ruiz, Coordinadora de la Igualdad de Género de la UNAM, recordó que para Sor Juana no había área del saber que no despertara su curiosidad; no había elemento de lo humano o de lo divino que no quisiera conocer, analizar o aprender; aun, viviendo en la época de la inquisición, tuvo valor para superar las barreras que se le imponían.

Afirmó que, tuvieron que transcurrir casi dos siglos para tener el primer registro femenino en nuestra universidad, cuando, en 1882, ingresó Matilde Montoya, la primera médica de México. Ahora, podemos celebrar que poco más de nuestro estudiantado en licenciatura son féminas, y que 44.5 % de las académicas de la UNAM son mujeres.

Estamos avanzando en la construcción de una universidad cada vez más incluyente e igualitaria pero aún nos queda mucho por hacer. Hoy en su premio nos reconocemos todas.

En representación de las universitarias de Bachillerato, María Esther Izquierdo Alarcón, del CCH Vallejo, dijo que el 8 de marzo se conmemora el Día Internacional de la mujer, formalizado por las naciones Unidas desde 1975; hoy -dijo- es momento de meditar acerca de los avances, cambios y determinaciones de las mujeres para transformar sus sociedades.



Al tomar la palabra Arlette López Trujillo de la FES Izcala, como representante de las universitarias de Facultades y Escuelas, mencionó que Sor Juana fue una mujer del siglo XVII que venció los obstáculos que se le presentaron, despertando la envidia y la persecución por su trabajo valioso, trascendente e intelectual.

Por su parte, Mónica González Contró, del Instituto de Investigaciones Jurídicas, como representante de las universitarias investigadoras, hizo una comparación entre las 81 mujeres que reciben este reconocimiento, quienes a pesar de ser de áreas distintas del conocimiento, distintos gustos, aficiones y ubicación geográfica, nos une en primer lugar, el amor al conocimiento y a las letras, en segundo lugar, la pasión por lo que hacemos, en tercero, la convicción de que en nuestra universidad se respira un ambiente de libertad y de igualdad de género. Las mujeres hemos ido avanzando, y una certeza sola tenemos, que la investigación, la docencia y la difusión de la cultura son los mejores medios para la transformación de la sociedad. |

## PREMIOS SMIE

### A LAS MEJORES TESIS DE DOCTORADO, MAESTRÍA Y LICENCIATURA

Este año los Premios SMIE a la mejor tesis de doctorado, de maestría y de licenciatura, lo obtuvieron estudiantes que realizaron su trabajo de investigación bajo la dirección de académicos de la Coordinación de Ingeniería Estructural del Instituto de Ingeniería.

El Dr. Francisco Héctor Bañuelos García recibió el Premio SMIE por su tesis doctoral *Desarrollo y validación de un procedimiento de diseño sísmico basado en desplazamientos*

*y control de daño para edificios considerando disipación pasiva de energía*, mismo que realizó bajo la supervisión del Dr. Gustavo Ayala Milián.

En esta tesis, se presentó un procedimiento de diseño sísmico basado en desplazamientos y control de daño para estructuras equipadas con amortiguadores de fluido viscoso lineales no-lineales. El comportamiento de estos dispositivos se aproxima mediante la suma de una matriz de amortiguamiento proporcional y una complementaria, la cual, es representativa del amortiguamiento no-proporcional, permitiendo la aplicación del procedimiento de análisis modal espectral convencional. Para considerar el efecto de los amortiguadores no-lineales se propuso una equivalencia, con la cual, es posible determinar el tamaño de estos dispositivos a través de un amortiguador lineal. Para ilustrar la aplicación del



procedimiento propuesto, se realizó una comparativa entre el desempeño obtenido con el procedimiento propuesto y con un análisis no-lineal paso a paso. Se consideraron ocho estructuras tanto de concreto como de acero con irregularidades en elevación. Como demanda sísmica, se consideró el espectro de respuesta correspondiente a la componente de un registro en particular. Los resultados obtenidos de estos muestran que se logra una buena aproximación de los objetivos de desempeño considerados en el diseño de los modelos desarrollados.

Asimismo, Nina Casas Guzik, recibió el Premio SMIE a la Mejor Tesis de Maestría con el tema *Ensayo de un edificio de mampostería confinada de 5 niveles a escala en mesa vibradora*, bajo la dirección del Dr. Sergio Manuel Alcocer Martínez de Castro.

La investigación desarrollada consistió en el ensayo en mesa vibradora de un modelo de cinco niveles de mampostería confinada a escala reducida. Este modelo completó el programa experimental planteado previamente, en el cual, se ensayaron edificios de uno, dos y tres niveles. La propuesta considera que la geometría del modelo sea similar a la de las estructuras ensayadas anteriormente, salvo un ajuste de escala por restricciones de peso y altura en la mesa vibradora.

Se propuso que durante la campaña experimental se aplicaran tanto métodos de evaluación no destructiva como pruebas de vibración ambiental, con el fin de determinar los periodos naturales de vibración y el amortiguamiento del espécimen antes de ser sometido a acciones dinámicas. Se planteó que el modelo fuera ensayado bajo registros de aceleración medidos, simulados y de intensidad creciente. Igualmente, se propuso que, durante el ensayo, se midiera la respuesta y se identificaran los distintos niveles de desempeño que caracterizan a la mampostería confinada, es decir, agrietamiento, resistencia y carga última.

De los resultados obtenidos, se identificó la evolución del daño y mecanismos de falla, además, se evaluó el comportamiento estructural en términos de propagación de daño, resistencia, rigidez, capacidad de deformación y disipación de energía.

Se presentan conclusiones y recomendaciones para las normas de diseño y construcción en estructuras de mampostería en la Ciudad de México.

También, Ileana Elizabeth Monsalvo Franco, se hizo acreedora al Premio SMIE a la mejor tesis de licenciatura titulada *Efectos de los amortiguadores de masa sintonizada en la respuesta sísmica de estructuras en la Ciudad de México*, el tutor de esta investigación fue el Dr. Héctor Guerrero Bobadilla.

En este trabajo, se llevó a cabo una investigación sobre la efectividad en el uso de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) del tipo péndulo en el control de la respuesta lateral de las estructuras debido a excitaciones sísmicas. Se presentó el análisis para estructuras con distinto periodo natural de vibración y para el movimiento sísmico de mayor intensidad registrado en la Ciudad de México. Los resultados obtenidos permitieron encontrar valores óptimos en los parámetros del AMS, los cuales indicaron que, efectivamente, es una opción factible para disminuir los desplazamientos laterales en las estructuras. Los resultados obtenidos con el método propuesto también fueron comparados con modelos hechos en un programa comercial; comprobando la efectividad del método y del AMS para todos los casos estudiados. Este tipo de sistemas han sido poco estudiados en nuestro país y se presentan como una alternativa factible y económica para aumentar la seguridad en las estructuras. El objetivo secundario de esta tesis fue incentivar la continuación de su estudio a mayor profundidad, es por ello que, una de las recomendaciones para investigaciones futuras es analizar el funcionamiento de este sistema de control de vibraciones con diferentes registros sísmicos de las diferentes zonas geotécnicas de la Ciudad de México, así como estudiar su efectividad en los casos donde la interacción suelo-estructura y la torsión pueden producir efectos significativos en la respuesta de las estructuras.

Los Premios los otorga la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE), ¡Enhorabuena! |



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM®

Como parte de los festejos por el 65 aniversario de la fundación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, invitamos a la comunidad a este primer evento:

## MESA REDONDA

# CIUDADES INTELIGENTES EN EL INSTITUTO DE INGENIERÍA



- **Ciudades inteligentes generadoras de bienestar**  
Dr. Luis Javier Castro Castro  
Académico Titular, Academia de Ingeniería México
- **Ciudades inteligentes para la sustentabilidad:  
Oportunidades, retos y limitaciones para el Sur Global**  
Dr. Gian Carlo Delgado Ramos  
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias  
en Ciencias y Humanidades-UNAM, México
- **Control y automatización en las Ciudades  
inteligentes: Caso de la Ciudad de Málaga**  
Dr. Francisco Guzmán Navarro  
Universidad de Málaga, España
- **Técnicas y tecnologías para las Ciudades inteligentes**  
Mtro. Pablo José Colás Murillo  
Instituto Mexicano de Ciudades Inteligentes y Sostenibles, México

Se llevará a cabo el día  
**lunes 26 de abril de 2021**  
**a las 12:00 horas**, en directo vía videostreaming

Evento gratuito en línea

<https://streaming.iingen.unam.mx>

