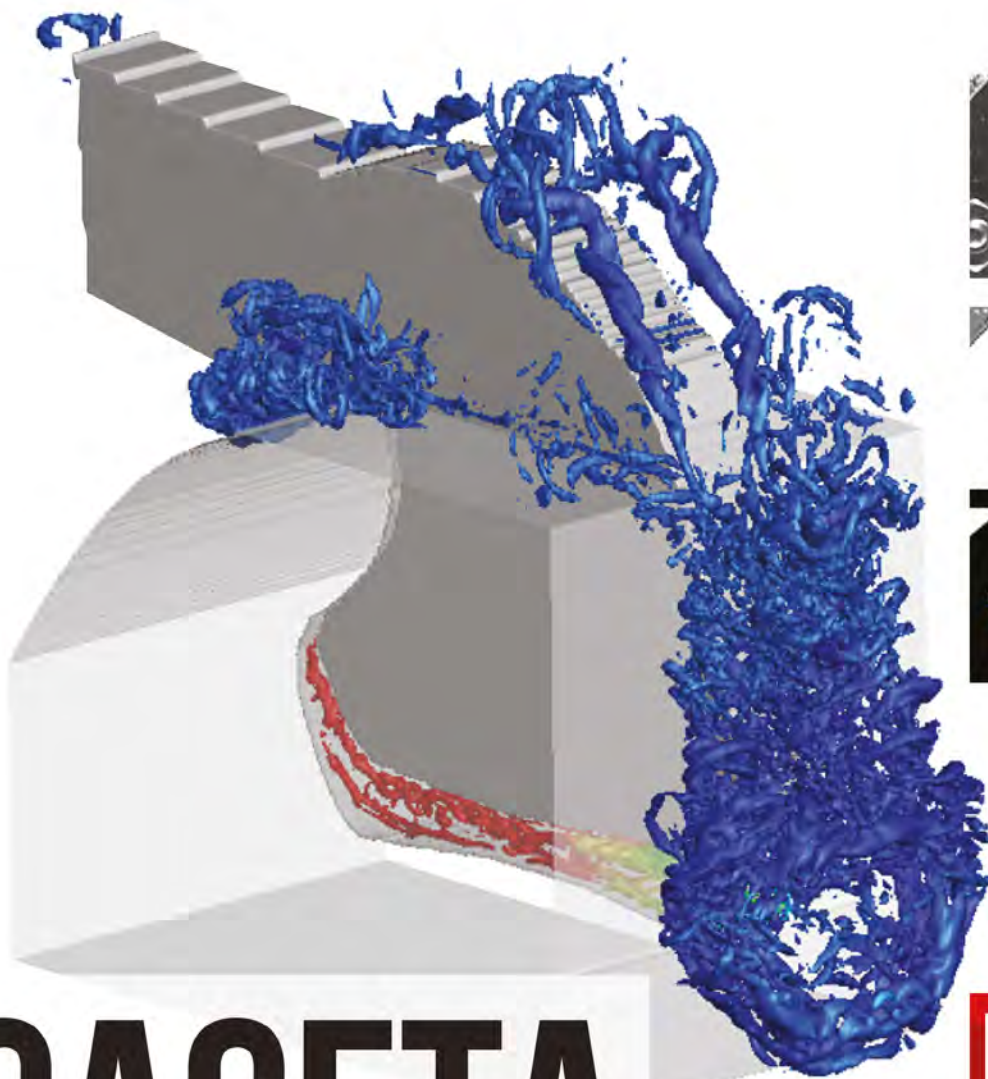




GACETA

DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

NÚMERO 142, MARZO - ABRIL, 2020
ISSN 1870-347X

**ROSA MARÍA
RAMÍREZ ZAMORA,
PRIMERA DIRECTORA
DEL IIUNAM**

**COORDINACIÓN DE
INGENIERÍA DE PROCESOS
INDUSTRIALES
Y AMBIENTALES**

Deshidratador
Geotérmico de Alimentos

Integración de Sistemas de
Captura de CO_2 en Centrales
Termoeléctricas de Ciclo
Combinado en México

Atomización
Ultrasónica de Combustibles

Laboratorio de Flujos
Multifásicos IIUNAM

Estudio de interacción
fluido-estructura
en conductos circulares

EDITORIAL

La H. Junta de Gobierno de la Universidad Nacional Autónoma de México me ha conferido la gran responsabilidad de dirigir y representar al Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM), durante el período 2020-2024. Considero que esta designación, que he aceptado con gran entusiasmo y compromiso, marca un cambio importante en la historia de este Instituto, debido a que desde su fundación, en la década de los años 50, es la primera ocasión que una mujer ocupa su Dirección. Esta es una señal clara de que el IIUNAM se está adaptando bien a los tiempos actuales, que demandan una evolución en los esquemas organizacionales y en las maneras de realizar sus labores fundamentales, es decir, la investigación, la formación de recursos humanos y la divulgación del conocimiento.

Una mayor incorporación en el IIUNAM de académicas competentes en esas tareas, enriquece y complementa las capacidades existentes para abordar de manera más amplia, integral y sólida los proyectos, la docencia y la formación de recursos humanos. Adicionalmente, el quehacer del IIUNAM debe ser también robustecido con el uso y desarrollo de tecnologías convergentes de la llamada Cuarta Revolución Industrial (CRI), que permitirán responder de manera pronta y, sobre todo, innovadora, a las necesidades que se requieran en el país para desarrollar nuevo conocimiento de vanguardia nacional y mundial. Todo lo anterior, para continuar con el crecimiento sostenido de su aportación al país, mediante la generación de conocimiento, docencia y formación integral de recursos humanos, así como en la difusión y divulgación de la ingeniería, en un contexto social, político y económico, nacional e internacional, cada vez más complejo y cambiante.



UNAM

Rector
Dr. Enrique L. Graue Wiechers
Secretario General
Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario Administrativo
Dr. Luis A. Álvarez Icaza Longoria
Secretario de Desarrollo Institucional
Dr. Alberto Ken Oyama Nakagawa
Secretario 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
Dr. Moisés Berezowsky Verduzco
Subdirector de Electromecánica
Dr. Arturo Palacio Pérez
Subdirector de Unidades Académicas Foráneas
Dr. Germán Buitrón Méndez
Secretario Administrativo
Lic. Salvador Barba Echavarría
Secretario Técnico
Arq. Aurelio López Espíndola
Secretario de Telecomunicaciones e Informática
Ing. Marco Ambríz 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
Lic. Oscar Daniel López Marín
Diseño
Lic. Oscar Daniel López Marín
Corrección de estilo
Gabriel Sánchez Domínguez
Impresión
Grupo Espinosa
Distribución
Guadalupe De Gante Ramírez

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.



El funcionamiento del IIUNAM es muy complejo, por la diversidad y magnitud de las actividades que realizan sus académicos y estudiantes en Ciudad Universitaria así como en sus sedes foráneas en Juriquilla, Sisal, Monterrey (Polo Universitario de Tecnología Avanzada) y, próximamente, en Morelia. Sin duda, el liderazgo, visión y dedicación de los directores que ha tenido el IIUNAM, junto con la labor de toda su comunidad, han permitido conjugar los esfuerzos de toda su plantilla laboral para lograr que hoy en día esta entidad goce de un alto prestigio y relevancia, con infraestructura y con sistemas de gestión académica y administrativa adecuados. En estos días al frente de la Dirección, he constatado que el prestigio de nuestro Instituto traspasa los ámbitos de la Ingeniería, siendo muy valorado en instancias dominadas por otras áreas del conocimiento.

Sin embargo, con la evolución del conocimiento y de las tecnologías, siempre existen áreas de oportunidad para mejorar el funcionamiento del IIUNAM, para continuar con el crecimiento sostenido de su aportación al país, mediante la maximización del impacto del conocimiento generado con los jóvenes talentosos formados, así como en la difusión y divulgación de la ingeniería con alta calidad.

Los retos que, confío enfrentaremos de manera conjunta toda la comunidad del IIUNAM, requieren que se considere la velocidad exponencial de los cambios que imponen actualmente, conceptos asociados a la CRI, como son el uso de tecnologías convergentes de información, comunicación y digitalización (La BIO, la NANO, la INFO y la COGNO-NEURO), para mejorar la adquisición y generación de conocimiento de frontera, así como, para adaptar la docencia y la formación integral de recursos humanos en ingeniería de modo consistente con las expectativas de nuestros alumnos y del mundo en el que se desarrollarán.

La propuesta de plan de trabajo que presenté a la Junta de Gobierno la desarrollé teniendo en mente que la misión de la persona que ocupe la dirección de una entidad académica

universitaria es, sobre todas las cosas, propiciar los medios y oportunidades para que todos los miembros de esta entidad puedan desarrollar su trabajo en las mejores condiciones de infraestructura y ambiente de trabajo. El plan de trabajo que propuse, se compone de seis ejes estratégicos y tres ejes transversales. Los ejes estratégicos propuestos son: 1) Vida y carreras académicas, 2) Líneas de Investigación, nuevas formas de trabajo y de desarrollo de proyectos, 3) Docencia y formación integral de recursos humanos, 4) Vinculación, 5) Administración integrada, moderna, transparente y eficiente, 6) Programa de desarrollo, ampliación y modernización de la infraestructura y equipamiento del IIUNAM. Los ejes transversales son: Cultura Organizacional con valores éticos y Equidad de Género.

De conformidad con la legislación universitaria, en los próximos meses someteré a las instancias correspondientes el Plan de Desarrollo 2020-2024. En este plan estarán incluidas las aspiraciones de la comunidad para avanzar hacia un Instituto más flexible e innovador en su quehacer, que acoja y desarrolle nuevas tecnologías. Los convoco a que, a través de los diversos mecanismos que implantaré, enriquezcan este plan de trabajo con el objetivo de que permita mejorar su labor en un ambiente adecuado de colaboración y respeto, para beneficio de la comunidad, y para que esta entidad académica siga siendo una referencia en la ingeniería a nivel nacional y, pueda serlo en el ámbito internacional.

Tengo muy claro que el Instituto no puede, ni debe, realizar su quehacer con las fórmulas del pasado; tenemos que innovar. Debemos atrevernos a cambiar y encabezar la transformación de la ingeniería mexicana. Seguramente nos equivocaremos, pero sabremos retomar el rumbo para seguir siendo el referente en ingeniería que tanto necesita nuestro país.

Dra. Rosa María Ramírez Zamora
Directora



ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA, DIRECTORA DEL IIUNAM 2020-2024

El Dr. William Lee, Coordinador de la Investigación Científica, felicitó a la Dra. Rosa María Ramírez Zamora por haber sido designada por la Junta de Gobierno como Directora del Instituto de Ingeniería (IIUNAM) para el periodo 2020-2024, quiero expresarle –dijo– el apoyo de la Coordinación de la Investigación Científica, de la Rectoría, de toda la Administración Central para llevar a cabo los proyectos que impulsen y fortalezcan a este Instituto.

El IIUNAM tiene una larga trayectoria, su comunidad es reconocida como líder en muchísimos temas de Ingeniería; se ha ido diversificando en la formación de recursos humanos, en la vinculación con la sociedad, en el desarrollo y propuesta de proyectos que tienen relevancia a nivel local, nacional e internacional; la tradición les viene claramente de origen porque la resolución de problemas nacionales siempre jugó un papel muy importante en su desarrollo.

Quisiera exhortar a toda la comunidad de este Instituto a sumar lo mejor de sus capacidades con la nueva Directora para desarrollar y concretar todos los proyectos individuales y colectivos trabajando juntos ya sea para el sector público, para el sector social o para el sector privado.

La proyección regional que les ha dado las sedes foráneas ha sido muy importante y representan una fortaleza de este Instituto.

Durante el proceso de auscultación, pude escuchar los planteamientos que quisieron manifestar y le pediría a la

Directora y a todo su equipo que los tome en cuenta, para articular este trabajo hay que ir buscando siempre el mejor equilibrio entre el fomento de investigación básica y a sus aplicaciones. La participación en proyectos externos tiene que ser evaluada y ponderada en términos de lo que se solicita y de lo que se puede y debe hacer aquí considerando la misión y los valores del Instituto.

Es importante fomentar la colaboración entre los diferentes grupos. Además, hay que resaltar la mención que hicieron ustedes de la necesidad de aprovechar las captaciones de manera transversal y multidisciplinaria, así como la imperiosa necesidad de incursionar en áreas de ingeniería moderna que el Instituto no ha desarrollado tan fuerte, pero en las que sin duda podrían tener un enorme impacto a nivel nacional, me refiero a áreas como inteligencia artificial, materiales y medio ambiente. Estos son algunos de los temas que varios de ustedes mencionaron en las últimas semanas, le pediré a la Directora y al grupo de trabajo que los tome en cuenta para la elaboración del Plan de Desarrollo. La situación externa del Instituto no es sencilla, hay que tomarlo en cuenta para lo que se quiere plantear, es una comunidad muy fuerte, muy bien planteada, yo tengo confianza que con el trabajo voluntario de todos ustedes lo van a hacer muy bien.

Por último, hizo un reconocimiento al Dr. Luis Álvarez Icaza y a sus colaboradores, por el compromiso y dedicación durante su gestión.

Al tomar la palabra, la Dra. Rosa María Ramírez dijo: es un gran honor y gran reto ser la primera mujer que va a representar en la Dirección a este Instituto tan grande y complejo, con tantas personalidades, pero con tantas capacidades, me da gran alegría y entusiasmo poder compaginar voluntades y capacidades para hacer cosas muy grandes. Esta designación es un ejemplo de que, para ocupar puestos directivos en cualquier entidad de la UNAM, lo que cuenta son las capacidades, la trayectoria, la propuesta de plan de trabajo, y no una cuestión de género. La situación actual demanda que el Instituto de Ingeniería aborde el uso de tecnologías convergentes, lo que se conoce como la nanotecnología y la biotecnología. También, es importante que tengamos una comunicación y colaboración dentro y fuera del Instituto.

Es necesario que tengamos un Consejo Directivo con la participación de expertos nacionales e internacionales, de las áreas empresarial, académica y de gobierno, para delimitar el rumbo que debemos seguir en nuestras líneas de investigación enfocadas al transporte, agua, aire, donde seguramente estarán las ciudades inteligentes, la cuestión de la fibra óptica y los microsistemas biomédicos. Líneas de vanguardia que permitirán formar a nuestros estudiantes para que sean más competitivos.

Desde la Dirección, voy a abrir los foros para propiciar los medios y las oportunidades para que cada quien encuentre posibilidades de colaboración, eso es muy importante, la misión como parte del cuerpo directivo. Pondremos a su disposición todas esas posibilidades que les va a facilitar establecer colaboraciones, tanto dentro como fuera. Estas son algunas de las ideas que tengo importantes para fortalecer nuestras capacidades.



Le doy las gracias al Dr. Álvarez Icaza, aprendí mucho con él, pero ahora se trata de imponer mi personalidad, mi perfil en un Instituto donde quiero que trabajemos juntos. No me resta más que darle las gracias a todos los que me apoyaron en este proceso, a mis colaboradores de la Secretaría Académica y a todos los candidatos que participaron en cada una de las etapas para lograr la designación de la persona que ocuparía la Dirección.

Muchas gracias. |



CIPIA

En la naturaleza como en cualquier proceso industrial, el transporte de masa y energía es de vital importancia por ello es de suma relevancia su estudio, así como la optimización de este transporte sin tener un impacto ambiental negativo.

Durante la gestión del Dr. Fernández Zayas fue creada esta coordinación de Ingeniería de Procesos Industriales y Ambientales, coloquialmente llamada simplemente CIPIA, con el fin de enfocar esfuerzos a este eje fundamental de la ingeniería.

Dentro de las líneas principales de investigación de la CIPIA se tienen: Transporte de masa y energía, uso racional y uso de fuentes renovables de energía, así como su impacto en el medio ambiente de los procesos que esto conlleva.

La coordinación está conformada por nueve investigadores y dos técnicos académicos, con formación de Ingenieros Mecánicos. Todos uniendo fuerzas y capacidades para resolver, tanto problemas de ciencia básica que generan nuevos conocimientos en el área de la mecánica de fluidos, así como de ingeniería aplicada que resuelvan problemas actuales.

Si bien esta coordinación fue inicialmente pensada para dar solución a diversos problemas puntuales del país, hoy en día existe un muy buen balance entre proyectos patrocinados que cubren este primer precepto y la investigación básica que permite la generación y difusión de la ciencia, a partir de trabajos presentados en congresos y publicados en revistas de alto impacto. Un punto fundamental que nunca se ha dejado de lado, es la formación de futuros ingenieros. Actualmente, alrededor de 80 estudiantes desde licenciatura, hasta doctorado trabajan en conjunto con nuestros académicos. Sin olvidar que se ha trabajado con estudiantes de bachillerato y de primaria en diferentes programas de iniciación a la ciencia.

Hoy en día se desarrollan dos proyectos de relevancia nacional: El estudio de impacto ambiental y ruido en el aeropuerto "General Felipe Ángeles" y el proyecto de deshidratación de frutas utilizando fluido geotérmico de baja entalpía en el domo de San Pedro, Nayarit, este último ganador del premio PRODETES 2019. Igualmente, se realiza investigación relacionada con motores de combustión, flujos multifásicos, transferencia de calor, secado de alimento, utilización de la geotermia de baja entalpía, simulación numérica en la mecánica de fluidos, entre otros.

La coordinación cuenta con tres laboratorios donde se realizan proyectos enfocados a la mecánica de fluidos. El Laboratorio de Flujos Multifásicos, en el edificio 8, cuenta con un circuito de varios metros de tubería donde se hacen experimentos con fluidos multifásicos (gas-líquido-sólidos) principalmente para la industria petrolera. El CICERM (Centro de Investigación de Crudo Extrapesado y su Recuperación Mejorada) en Yucatán enfocada al transporte de petróleo. Finalmente, el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Computacional, ubicado en la Torre de Ingeniería, donde se desarrollan herramientas para el estudio numérico de la mecánica de fluidos.

Con todo lo anteriormente dicho, podemos concluir que la CIPIA es una coordinación que cumple cabalmente con las directrices del Instituto de Ingeniería. Resolver problemas nacionales con retribuciones económicas extraordinarias (lo que permite proporcionar un estipendio a nuestros estudiantes y mantener actualizado nuestro equipamiento), la generación de nuevos conocimientos y su difusión mundial, así como la generación de ingenieros especializados que el país requiere.

Dr. Martín Salinas
Coordinador

DESHIDRATADOR GEOTÉRMICO DE ALIMENTOS (DGA) IIIDEA FRUTOS DEL VAPOR HÉCTOR AVIÑA Y EDUARDO PÉREZ

Considerando que los principales problemas a nivel mundial son las pérdidas y desperdicio de alimentos en todo el mundo; el Grupo iiDEA (Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas) ha desarrollado el sistema Deshidratador Geotérmico de Alimentos (DGA), con el objetivo de proveer una solución sustentable a la conservación de alimentos y, al mismo tiempo, desarrollar tecnología nacional para el aprovechamiento de la energía geotérmica de mediana y baja temperatura ($T \leq 150^\circ\text{C}$).

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) estima que se pierde cerca de 1,300 millones de toneladas de alimentos, lo que incluye 30% de los cereales; entre 40 y 50% de las raíces, frutas, hortalizas y semillas oleaginosas; 20% de la carne y productos lácteos, y 35% de los pescados. Si estos alimentos se pudieran rescatar, serían suficientes para alimentar a 2,000 millones de personas (FAO, 2019). Por lo anterior, con el propósito de conservar los alimentos por más tiempo, a través de un método natural y sostenible, se está trabajando en el Sistema Deshidratador Geotérmico de Alimentos, modelo DGA600. Esta planta estará operando en el segundo semestre de 2020 con una capacidad

de producción de 450 hasta 600 kg de frutos deshidratados diarios. Lo anterior implica que, para producir 600 kg de piña, habrá que comprar 12 toneladas de fruta y obtener 6 toneladas de pulpa (50% del peso de la piña se pierde al retirar la cáscara y la corona), que será procesada a partir de una humedad inicial de 85 a 15% de humedad final.

Más de ocho años de impulsar el aprovechamiento integral de la energía geotérmica

La energía geotérmica es energía térmica acumulada en el interior de la tierra, se origina por el desplazamiento de las placas tectónicas, decaimiento de elementos radiactivos, así como la migración de la energía térmica a la superficie por conducción y convección. Este fenómeno, aunado con la acumulación de agua de meteórica bajo la superficie terrestre, da origen a diferentes manifestaciones geotérmicas como los volcanes, fumarolas o geiseros, ríos de aguas termales, entre otros.

Los recursos geotérmicos se clasifican como alta, mediana y baja entalpía, éstos están asociados con el nivel de energía térmica que tienen. La energía eléctrica producida con el vapor de la tierra se extrae a partir de los 1,000 m de profundidad con temperaturas de hasta 370°C . Los de mediana y baja entalpía no requieren gran profundidad, pueden ser superficiales o con pozos de 100 o 200 metros; por ejemplo, el agua proveniente de los balnearios, que es de baja entalpía, proviene por lo regular de manifestaciones geotérmicas superficiales, por lo que no es necesario perforar pozos para su aprovechamiento.



El DGA busca aprovechar el calor de la tierra, no sólo para los balnearios, también para generar diversos procesos asociados con la generación de una cadena de valor que suministren servicios o productos terminados, como la fruta deshidratada.

¿Cómo funciona?

El Sistema DGA sustrae energía térmica del fluido geotérmico, y calienta una masa de aire, misma que se encarga de remover la humedad en los alimentos, por lo que el fluido geotérmico no tiene ningún contacto con los alimentos, solo se ocupa como medio de transporte de la energía térmica. El principio del funcionamiento del DGA es incrementar la temperatura del aire, lo que ocasiona que su humedad relativa disminuya (aire seco); posteriormente, el aire seco ingresa a la cámara de deshidratación para sustraer la humedad en los alimentos. El secado o deshidratado de los alimentos está asociado con un diferencial de humedades entre el alimento y el ambiente. La humedad migra por efecto de difusión capilar del interior del alimento hacia su superficie y finalmente hacia la masa de aire seco que lo rodea.

La ventaja de los sistemas geotérmicos de mediana y baja entalpía radica en la disponibilidad, ya que para aprovecharlos no se requiere invertir demasiado en exploración sin necesidad de hacer perforación. Para el caso del Sistema DGA, el aprovechamiento de la energía térmica proviene de los remanentes térmicos de una geotermoeléctrica, ubicada en el Municipio San Pedro Lagunillas, Nayarit. La planta es administrada por la empresa Grupo Dragón, que a través de un convenio de colaboración, ha sido posible probar la tecnología desarrollada en el Instituto de Ingeniería (IIUNAM).



En 2012 el proyecto IMPULSA IV (Programa de Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica), actualmente grupo iiDEA, retomó la deshidratación de alimentos como línea de investigación. De 2012 a 2013 el prototipo DGA10 se rehabilitó e iniciaron los trabajos de experimentación. Un año más tarde fue seleccionado para desarrollarse en el marco de la investigación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), a través del proyecto P11 “Desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía”. El objetivo general del CeMIE-Geo fue establecer una alianza académica industrial que promueva:

- El desarrollo y la innovación en materia de geotermia.
- La formación de recursos humanos especializados.
- El fortalecimiento a la investigación y al desarrollo tecnológico.

Grandes problemas, grandes producciones

El IIUNAM y la empresa PI INGENERA fueron ganadores del premio PRODETES 2018, que otorgó financiamiento para construir una planta DGA600, su principal compromiso es la entrega de la planta operativa y, consecuentemente, mantener una participación en la generación de tecnología mexicana, recursos humanos especializados en el aprovechamiento de la energía geotérmica, y proyectos que fomenten el desarrollo sostenible. Este proyecto podrá dar empleo a 50 personas de manera directa y 60 de manera indirecta.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible publicados por la ONU son 17, de los cuales, el proyecto DGA600 cumple con los siguientes: 2) Hambre Cero, 5) Igualdad de Género, 7) Energía asequible y no contaminante, 8) Trabajo decente y crecimiento económico, y 13) Acción por el clima. |

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE CAPTURA DE CO₂ EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE CICLO COMBINADO EN MÉXICO

JAVIER AGUILLÓN MARTÍNEZ

Esta investigación es el resultado de una tesis doctoral de Jordán Pérez Sánchez realizada bajo la dirección del Dr. Javier Aguillón, investigador titular del IIUNAM. Trabajo que se hizo acreedor al segundo lugar del Premio CFE-Fundación UNAM 2018.

El tema surge a raíz de que en la 11ª Conferencia Internacional sobre Tecnologías de Control de Gases de Efecto Invernadero (GHGT-11), que tuvo lugar en la ciudad de Kyoto, Japón en 2012, se estableció que los países deben enfocar sus estudios en la disminución a gran escala de la emisión de gases efecto invernadero en la generación de energía eléctrica. Apparently estas medidas acarrear altos costos. Sin embargo, son numerosas las ventajas que esto representa para el planeta.

El calentamiento global y los daños ambientales están relacionados con las emisiones de CO₂; estas emisiones provocan el llamado gas de efecto invernadero conocido como una amenaza potencialmente grave para el medio ambiente de la Tierra (Lu *et al.* 2015; Shamiri *et al.* 2016). El perfil de emisiones de CO₂ de México está muy inclinado

hacia el transporte, en 2013 representó 32% de las emisiones relacionadas con la energía. A esto le siguió 25% del sector eléctrico, 21% del sector industrial, principalmente en la fabricación de cemento, y 10% de la industria petroquímica.

Según reporte de la IEA (International Energy Agency 2016) las proyecciones indican que la dependencia futura a los combustibles fósiles es inminente, específicamente a la generación de energía eléctrica a través del gas natural, por lo que necesitamos implementar sistemas más eficientes.

La manera más eficiente de producir energía eléctrica en México es por medio de las centrales térmicas de ciclo combinado (NGCC por sus siglas en inglés).

En nuestro país, según reporte de marzo de 2015, tenemos una generación global de alrededor de 54,902 MWe con un aumento aproximado de 10% en comparación con 2002; en la figura 1 se aprecia que las energías renovables incluyen la energía nuclear, geotérmica, eólica, hidroeléctrica y fotovoltaica. El carbón incluye carbón pulverizado doble, además, el gas incluye el ciclo combinado y turbogas.

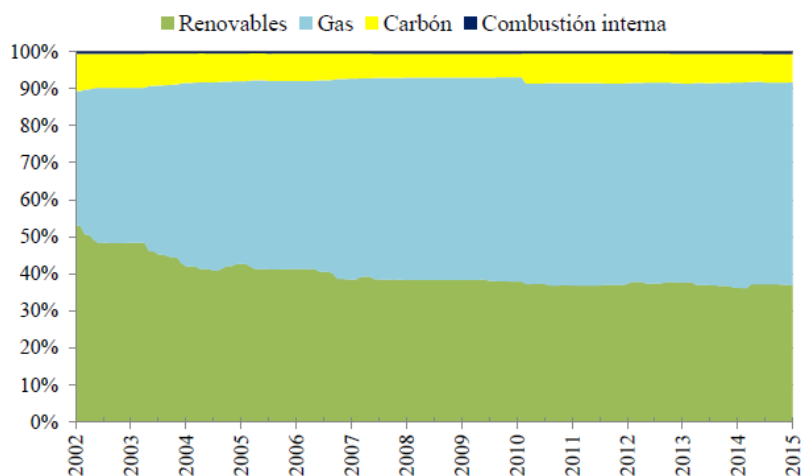


Figura 1. Porcentaje de generación por tipo de combustible desde 2002-2014 (En renovables se incluye Nucleoeléctrica, Geotérmica, Eólica, Hidroeléctrica y Fotovoltaica). Para Carbón se incluye carboeléctrica y Dual, finalmente, para Gas se incluye Ciclo combinado y Turbogás (elaboración propia)

Por su parte, la Comisión Federal de Electricidad publica en 2014 que es prioritaria la integración de los sistemas de captura de CO_2 en plantas de ciclo combinado dentro del concepto de Tecnologías de Generación Limpia¹; a raíz de esta publicación en el Diario Oficial de la Federación 2016 (DOF), se declara que “el país asume el objetivo indicativo o el objetivo aspiracional de reducir para 2020, 30% de las emisiones con respecto a la línea de base; así como una reducción de 50% en las emisiones para 2050 en relación con las emitidas en 2000”.

Con el fin de conocer cuáles son las turbinas más adecuadas para el proceso de captura de CO_2 de acuerdo con las tecnologías usadas en México, el Dr. Aguillón junto con el proyecto doctoral y otros investigadores del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), se dedicaron en primer lugar, al estudio del funcionamiento de las distintas turbinas utilizadas por CFE en la generación de energía eléctrica. Entre las turbinas estudiadas se encuentran tanto las clases F de *General Electric* (GE) (en la actualidad obsoletas) y las de gas de alta eficiencia (ElKady *et al.* 2009; European Commission Joint Research Centre 2009; U. S. Department of Energy 2010a; Olson *et al.* 2014; CB&I Stone & Webster 2015; González-Salazar 2015).

En segundo lugar, se estudiaron las tecnologías de captura de CO_2 con aminas en climas cálidos y tropicales que no habían sido estudiados anteriormente; estas tecnologías deben ser ampliamente estudiadas para poder implementarse en una de las principales fuentes de emisiones de CO_2 como es el caso de la generación de energía eléctrica en México.

De acuerdo con los estudios realizados sobre las turbinas, una vez seleccionada la turbina más adecuada, se procedió a estudiar el comportamiento de los diferentes tipos de tecnologías de captura de CO_2 llamadas aminas, entre las que se encuentran las de recirculación de gases de escape (EGR), las aminas utilizadas en la turbina de gas evaporativa (EvGT), las aminas por combustión suplementaria (SFC), la de combustión externa (EFC), así como los sistemas alternos con reciclado selectivo de gases de escape (S-EGR) e híbridos.

Integración de sistema de captura de CO_2 (EGR)

Adicionalmente, se realizó una investigación sobre las turbinas que existen en México que podrían utilizar aminas: Mitsubishi (15%), Siemens (41%) y General Electric (44%), de las cuales los modelos seleccionados son: M-501 GAC, SGT6-8000H y GE7HA.01 respectivamente. Estos equipos fueron evaluados a través del programa computacional Thermoflex 26®, con el cuál, se obtuvo el Costo Nivelado de Electricidad (CNE) donde Mitsubishi obtuvo 31.46 USD/MWh, Siemens 31.18 USD/MWh y General Electric 31.05 USD/MWh.

Los resultados del estudio muestran que la turbina General Electric ofrece el Costo Nivelado de Electricidad más bajo y la tecnología de aminas EGR fue el esquema que presentó menor penalización energética al implementar la tecnología de Captura y almacenamiento de CO_2 (CCS por sus siglas en inglés) (ver figura 2).

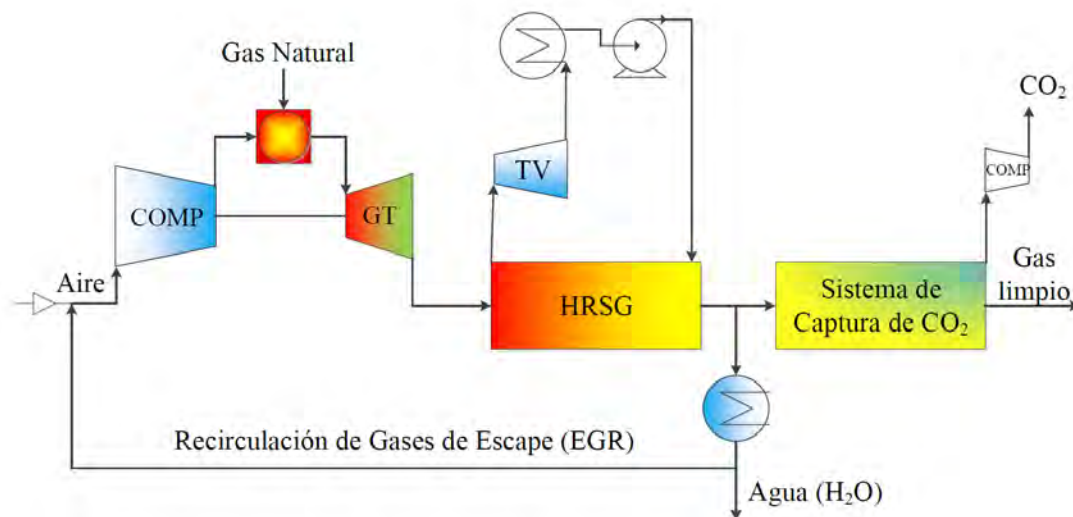


Figura 2. Diagrama simplificado de una NGCC con recirculación de gases de combustión y captura de CO_2 , elaboración propia a partir de Merkel *et al.* (2013)

1. También es llamada Nueva Generación Limpia (NGL)

Resultados de la integración del sistema de captura (EGR)

Una vez obtenido el CNE y conociendo la mejor tecnología de captura de CO_2 , se procedió a realizar la integración de estos parámetros durante la simulación computacional de escenarios para detectar el precio óptimo de acuerdo con la concentración de CO_2 en los gases de salida. El escenario base fue de 32.94 USD/MWh con una reducción en el CNE hasta de 10 USD/MWh para los escenarios que integran estas tecnologías. Para que esto se dé, hay que aumentar 40% de EGR y el contenido de CO_2 de 4.2 a 7.1% en moles.

Además, el Consumo Específico de Energía Primaria para CO_2 evitado (SPECCA por sus siglas en inglés) mínimo es de 3.18 GJ/t CO_2 para 40% de EGR, en comparación con 3.68 GJ/t CO_2 para NGCC-CCS (ver figura 3).

Conclusiones

Esta metodología también fue probada en sistemas de cogeneración de pequeña escala, donde se comprobó la posibilidad de extrapolar la metodología a sistemas de menor capacidad, así como a la integración de sistemas que utilicen energías renovables.

Los resultados obtenidos en este estudio respaldan el uso de la metodología para la evaluación de tecnologías

NGCC en México. Esto se puede usar en el futuro para obtener un costo de referencia teórico por la implementación del sistema de captura de CO_2 a nuevos sistemas de generación de electricidad.

Los sistemas de producción que emiten emisiones cercanas a cero requieren inversiones iniciales muy grandes, por lo que los sistemas NGCC-CCS de alta eficiencia y bajas emisiones sólo pueden implementarse a través del apoyo gubernamental mediante impuestos al carbono o financiamiento nacional.

Recomendaciones

Con la investigación realizada, se recomienda implementar sistemas de captura de CO_2 a sistemas de generación de ciclo combinado, sólo si cuentan con sistemas de recirculación de gases a 40%, ya que el incremento en el costo de la producción de electricidad fue el menor para los casos con captura. Adicionalmente, en plantas de generación de energía existentes se recomienda implantar la tecnología de CCS, propuesta por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, siempre y cuando se pueda implementar en todas las turbinas del sistema.

Se recomienda usar la configuración del sistema de captura de CO_2 estudiada en este trabajo, por su madurez tecnológica, por ser punto de referencia a nivel internacional, así como su fácil comparación con otros sistemas en el mundo.

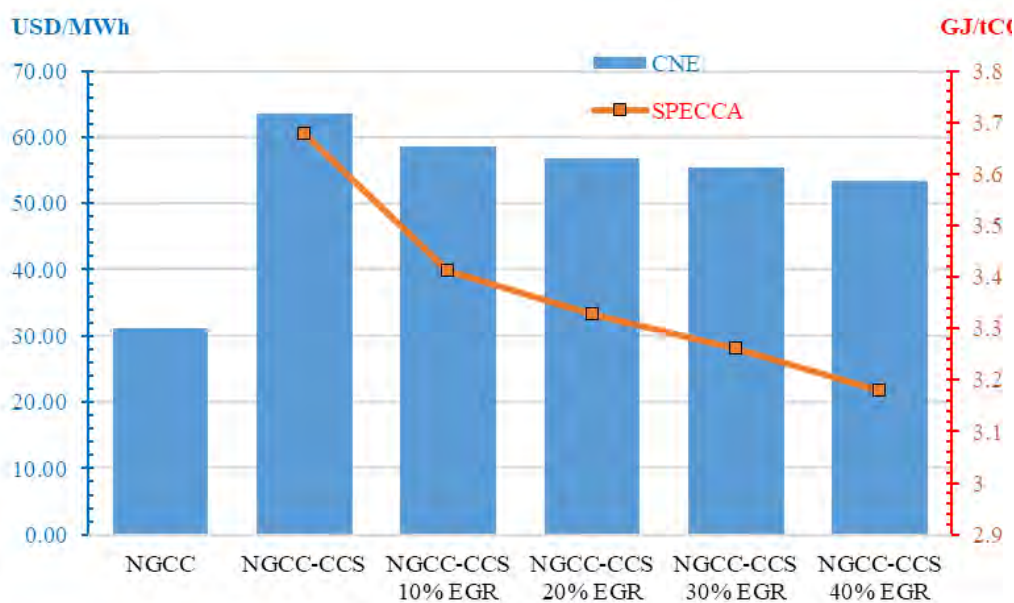


Figura 3. Comparativa del incremento de CNE para el sistema NGCC con captura de CO_2 y sistema EGR con SPECCA, elaboración propia

Referencias

1. CB&I Stone & Webster I. (2015). Assessment of Natural Gas Combined Cycle Plants for Carbon Dioxide Capture and Storage in a Gas Dominated Electricity Market.
2. CFE (2014a). Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico. POISE 2014-2028.
3. DOF (2016). Ley General de Cambio Climático. 01-06-2016 1-44.
4. ElKady A. M., Evulet A., Brand A., *et al.* (2009). Application of Exhaust Gas Recirculation in a DLN F-Class Combustion System for Postcombustion Carbon Capture. *J Eng Gas Turbines Power* 131:034505. doi: 10.1115/1.2982158.
5. ElKady A. M., Evulet A., Brand A., *et al.* (2009). Application of Exhaust Gas Recirculation in a DLN F-Class Combustion System for Postcombustion Carbon Capture. *J Eng Gas Turbines Power* 131:034505. doi: 10.1115/1.2982158.
6. González-Salazar, M. A. (2015). Recent developments in carbon dioxide capture technologies for gas turbine power generation. *Int J Greenh Gas Control* 34:106-116. doi: 10.1016/j.ijggc.2014.12.007.
7. International Energy Agency (2016). Mexico Energy Outlook Special Report.
8. Lu J. G., Gao L., Wang J. T., *et al.* (2015). Prediction and validation of physical property for a CO₂ capture agent of aqueous (potassium citrate + 2-amino-2-methyl-1-propanol). *J. Nat. Gas. Sci. Eng.* 27:1574-1584. doi: 10.1016/j.jngse.2015.10.025.
9. Merkel T. C., Wei X., He Z., *et al.* (2013). Selective Exhaust Gas Recycle with Membranes for CO₂ Capture from Natural Gas Combined Cycle Power Plants. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52:1150-1159. doi: 10.1021/ie302110z.
10. Olson A., Nick S., Kush P., Gabe K. (2014). Capital Cost Review of Power Generation Technologies. *West Electr Coord Counc* 105.
11. Shamiri A., Shafeeyan M. S., Tee H. C., *et al.* (2016). Absorption of CO₂ into aqueous mixtures of glycerol and monoethanolamine. *J. Nat. Gas. Sci. Eng.* 35:605-613. doi: 10.1016/j.jngse.2016.08.072.

ATOMIZACIÓN ULTRASÓNICA DE COMBUSTIBLES

RUBÉN C. ESQUIVEL,
JOSÉ E. RAMÍREZ Y WILLIAM VICENTE

Durante 2018, 85% de la energía consumida a nivel global se obtuvo de la quema de combustibles fósiles, del cual, 30% provino de la quema de petróleo y sus derivados (B. P., 2019). De acuerdo con los pronósticos de B. P. (Energy Outlook, 2019), para 2040 el consumo de combustibles no disminuirá, no obstante, en el caso de la gasolina y el diésel, éstos serán mayoritariamente sustituidos por biocombustibles. Para facilitar esta transición y obtener energía de una combustión más limpia y eficiente, uno de los proyectos de investigación del UNICE (Unidad de Investigación y Control de Emisiones), es mejorar la quema de combustibles líquidos a través de la producción de aerosoles más finos. Durante la combustión se quema una mezcla de aire-combustible; si el combustible se encuentra en fase líquida, el tamaño y la concentración de las gotas afectarán: la velocidad de propagación del frente de flama, el porcentaje de combustible quemado y las emisiones resultantes. Para producir tal mezcla, el combustible debe ser atomizado; en la actualidad, dicha tarea la realizan inyectores que generan aerosoles de tamaños

dispersos no óptimos para la combustión, esto debido a su principio de funcionamiento: alta velocidad.

En este proyecto participan investigadores y estudiantes tanto del Instituto de Ingeniería como de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Atomización ultrasónica

Al dirigir ondas acústicas de alta frecuencia e intensidad a una superficie líquida, en ella crecen ondas capilares que desprenden partículas de sus crestas cuando alcanzan una amplitud crítica. La tasa de generación de aerosol es proporcional a la intensidad acústica aplicada mientras que el tamaño de las partículas depende de la frecuencia de la onda y las propiedades del fluido excitado. Este fenómeno se conoce como atomización ultrasónica, el cual, permite obtener aerosoles de partículas pequeñas y homogéneas eyectadas a baja velocidad. Aproximadamente, se obtienen diámetros medios de Sauter (la media de la razón volumen-superficie del aerosol) de cinco micras para el agua en frecuencias del orden de los megahertz y velocidades de un metro por segundo (Lozano, 2014).

Para desarrollar atomizadores que aprovechen el ultrasonido como principio de funcionamiento es indispensable obtener un modelo que permita conocer las características del aerosol en función de las propiedades del fluido y los parámetros de atomización.

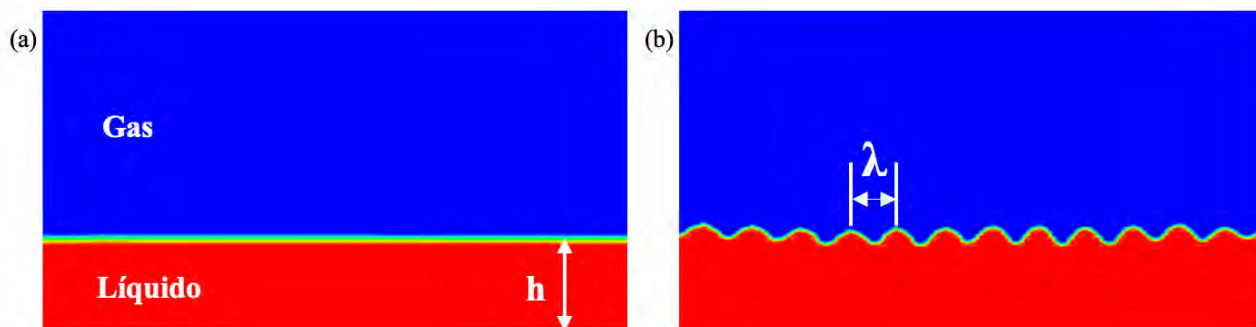


Figura 1. a) fracción de volumen; b) longitud de ondas capilares

Metodología

Un aerosol se describe mediante su distribución numérica o volumétrica, es decir, funciones que expresan el porcentaje de gotas o de volumen contenido en partículas de un cierto diámetro. Para calcular una distribución representativa se emplea el formalismo de máxima entropía. Dicha herramienta consiste en obtener una distribución a partir de la maximización de una entropía sujeta a restricciones; estas restricciones conllevan la información física del fenómeno y toman la forma de los diámetros medios volumétrico y superficial, los cuales son el segundo y tercer momento de la distribución numérica del aerosol. Los diámetros medios fueron obtenidos de correlaciones desarrolladas mediante análisis dimensionales de datos experimentales, así como de una simulación numérica que permitió una mejor comprensión de la física del fenómeno.

Las correlaciones de los diámetros medios fueron planteadas asumiendo que los diámetros son proporcionales a la longitud de onda capilar (*Rajan y Pandit, 2001*). Tanto la expresión de la longitud de onda como los coeficientes de proporcionalidad fueron obtenidos empíricamente mediante un análisis de regresión de los parámetros involucrados en el fenómeno (frecuencia, gasto e intensidad) adimensionalizados con las propiedades del fluido. Los datos para el análisis de regresión se obtuvieron de artículos experimentales.

Para estudiar a detalle la física involucrada en el fenómeno se realizó una simulación numérica de la atomización, la cual se representó con un modelo bifásico (Figura 1a) en un dominio bidimensional cartesiano. En la parte superior del dominio se definió la fracción de gas (aire) y en la parte inferior la fracción

líquida (una película de altura “h” de agua destilada). La pared inferior se excitó a través de una función sinusoidal variable en el tiempo (y) para proporcionar el movimiento que da el origen a las ondas capilares en la interfase.

Resultados

Las expresiones empíricas de los diámetros medios se utilizaron en conjunto con el formalismo de máxima entropía para calcular las distribuciones volumétricas de casos documentados experimentalmente. La Figura 2 compara la distribución de la densidad de probabilidad contra la distribución experimental para cuatro casos realizados con agua (*Mizutani et al., 1970*). Se utilizó la prueba de semejanza entre distribuciones de Kolmogorov-Smirnov para determinar la confiabilidad con que las distribuciones calculadas representan a las experimentales. Para el primer caso (Fig. 2a) la confiabilidad es de 43%, para el segundo caso (Fig. 2b) es de 20%, para el tercer caso (Fig. 2c) de 51%, y para el cuarto (Fig. 2d) de 54%.

La simulación numérica se resolvió usando el *software* Ansys Fluent 19.0. En la Figura 1b, se observa que para un tiempo final se forman las ondas capilares de longitud de onda “λ” en la interfase. Las crestas de cada onda se pueden representar por medio de vectores de velocidad, como se presenta en la Figura 3. Se aprecia como el fluido líquido sube y va tomando la forma de crestas, hasta el punto máximo donde su velocidad es cero, posteriormente descende en forma de fuente. Los resultados numéricos fueron validados con los datos experimentales de las longitudes de onda capilares para diferentes casos (*Eisenmenger, 1959 y Ramisetty et al., 2013*), como se muestra en la Figura 4.

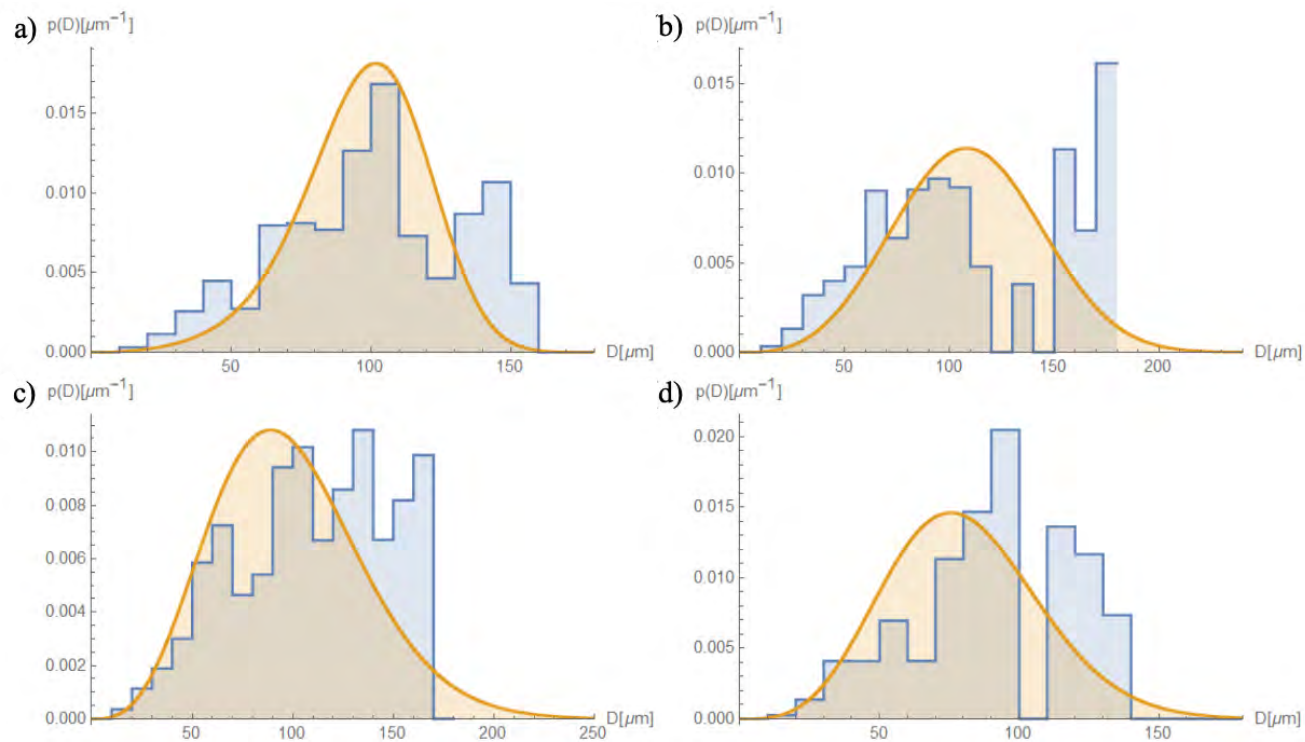


Figura 2. Comparación de las distribuciones calculadas, de color naranja, con las experimentales, de color azul para atomización de agua a) frecuencia de 40 kHz, desplazamiento de 4.5 μm y gasto de 10 cc/min, b) 40 kHz, 7 μm y 30 cc/min, c) 60 kHz, 4.7 μm y 20 cc/min, d) 70 kHz, 3.9 μm y 20 cc/min

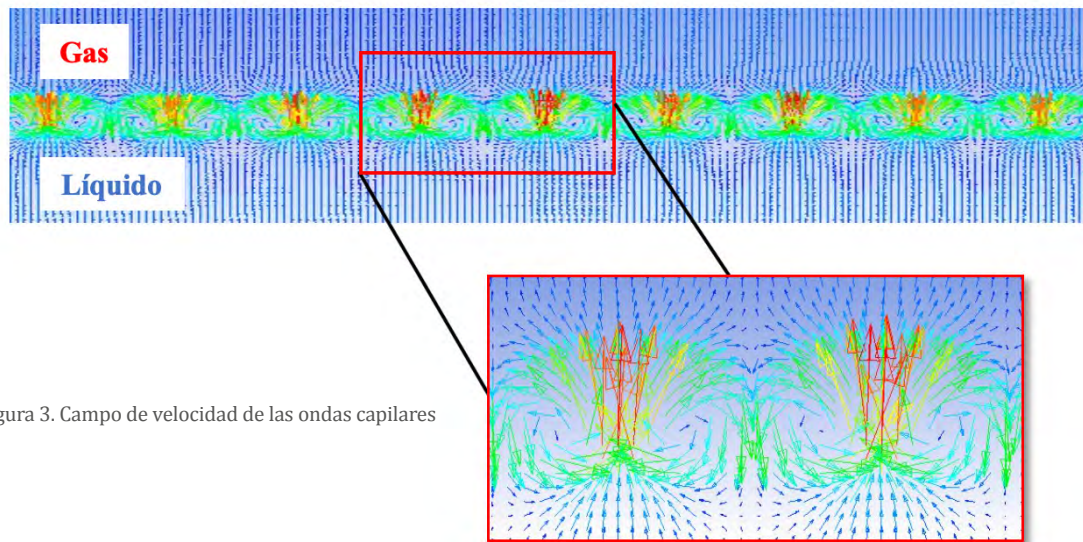


Figura 3. Campo de velocidad de las ondas capilares

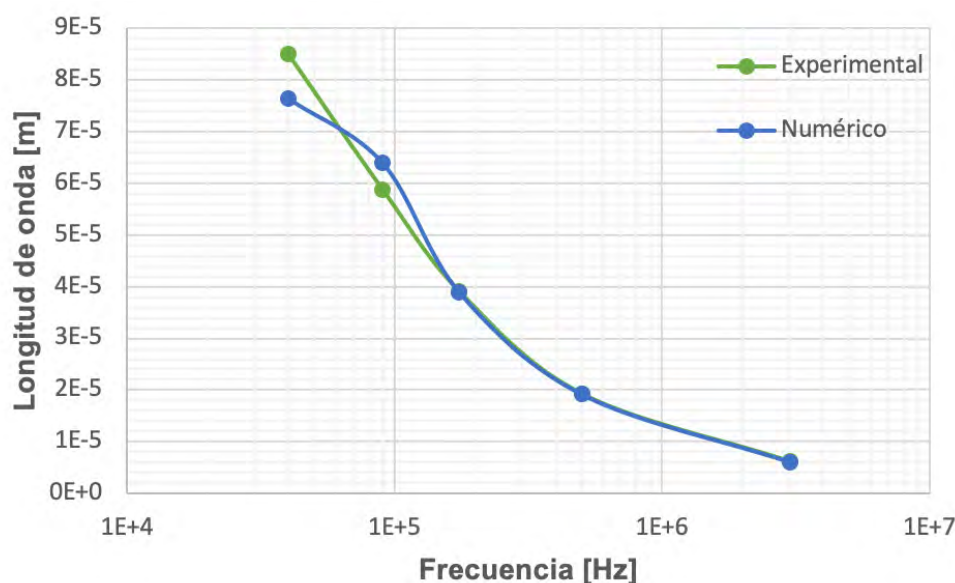


Figura 4. Comparación de las longitudes de onda calculadas con las experimentales

Conclusiones

La metodología establecida puede estimar las distribuciones de los aerosoles, demostrando ser una herramienta útil para el desarrollo de atomizadores en aplicaciones de combustión, médicas e industriales. La simulación numérica ha quedado validada a través de comparar las longitudes de onda calculadas con las experimentales.

El trabajo que se realiza actualmente es la validación experimental en altas frecuencias (megahertz), al igual que el cálculo de los diámetros medios de las partículas atomizadas en la simulación numérica.

Posteriormente se plantea llevar la tecnología a aplicaciones de atomización de combustibles fósiles y biocombustibles.

Referencias

1. BP. 2019. *Energy Outlook: 2019 edition*.
2. BP. 2019. *Statistical Review of World Energy 2019*.
3. Eisenmenger, W. 1959. «Dynamic properties of the surface tension of water and aqueous solutions of surface active agents with standing capillary waves in the frequency range from 10 kcs to 1.5 Mcs.» *Acustica* 9: 327-340.
4. Lozano, A., A. González-Espinosa, J. A. García, E. Calvo, J. Barroso y F. Barreras. «High flow-rate ultrasonic seeder.» *Flow Measurement and Instrumentation* 38: 62-66.
5. Mizutani, Yukio, Yasutake Uga y Takeo Nishimoto. 1972. «An investigation on ultrasonic atomization.» *Bulletin of JSME* 15 (83): 620-627.
6. Rajan, Raghavachari, y Aniruddha B. Pandit. 2001. «Correlations to Predict Droplet Size in Ultrasonic Atomisation.» *Ultrasonics* 39 (4): 235-255.
7. Ramisetty, Kiran. A., Aniruddha. B. Pandit y Parag. R. Gogate. 2013. «Investigations into Ultrasound Induced Atomization.» *Ultrasonics Sonochemistry* 20 (1): 254-264.

LABORATORIO DE FLUJOS MULTIFÁSICOS IUNAM

ALEJANDRO RODRÍGUEZ VALDÉS,
ARTURO PALACIO PÉREZ Y
JONATHAN HERNÁNDEZ GARCÍA

Actualmente, dentro del Edificio 8 del Instituto de Ingeniería, se cuenta con un circuito experimental para el estudio de flujos multifásicos de alta y baja viscosidad, el cual fue rediseñado y construido en su totalidad entre los meses de octubre de 2016 y julio de 2017 con el apoyo recibido a través del fondo SENER-CONACYT subsector Hidrocarburos. Mediante los experimentos que se realizan en este circuito experimental, se busca contribuir al entendimiento y solución de problemas asociados al transporte de aceites pesados y extra-pesados; siendo estos últimos los recursos fósiles predominantes en nuestro país y en el mundo.

En la figura 1, se puede apreciar la sección de bombas y medidores de flujo del circuito; la figura 2a muestra las vistas de planta y lateral del mismo, y en la figura 2b un par de imágenes de la sección de pruebas donde se realiza el monitoreo de las variables del flujo (presión, temperatura y distribución de fases).

La sección de pruebas está diseñada para reproducir situaciones similares a las que se presentan al transportar aceites pesados y extra-pesados, como es el caso desde los cabezales de pozos hasta las Estaciones Recolectoras en las instalaciones de PEMEX; tiene una longitud aproximada



Fig. 1. Zona de máquinas del sistema experimental



Fig. 2b. fotografías de la sección de pruebas del circuito para el estudio de flujos multifásicos

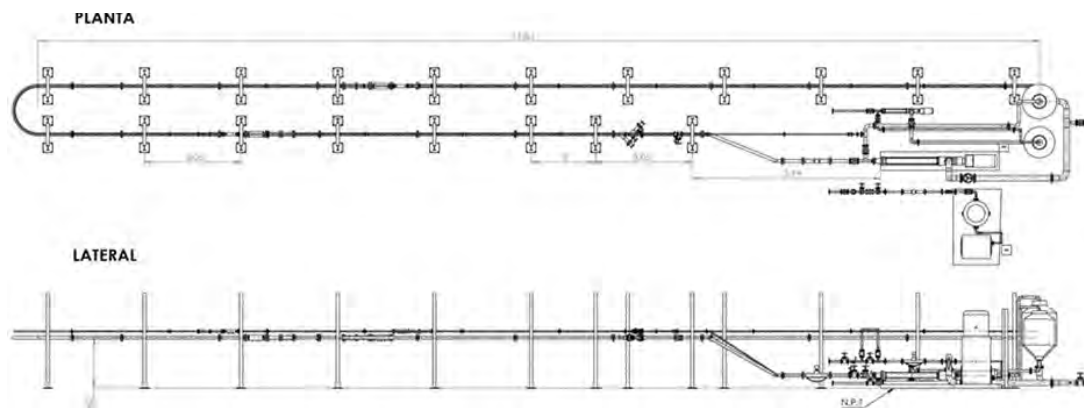


Figura 2a. Vistas lateral y de planta del sistema experimental para el estudio de flujos multifásicos

de 50 m (medidos desde el punto de inyección de la mezcla hasta la desembocadura en el tanque separador), se compone de quince tramos intercambiables de tubería de acero al carbón sin costura de 0.0762 m (3 in) de diámetro nominal, cédula 80, para soportar altas presiones de operación (2,500 PSI); cuenta con uniones bridas del tipo encastrado soldable norma ANSI B16.5, con sellos fabricados en politetrafluoroetileno (Teflón) y con accesorios para el control de flujo mediante válvulas de esfera marca Worcester, clase 150. En las zonas de baja presión (retorno), se cuenta con secciones de visualización hechas con PVC transparente de 0.0762 m (3 in) de diámetro nominal (cédula 40). Una serie de soportes metálicos fabricados con vigas de acero estructural tipo IPR de 6x4 pulgadas permiten ajustar la inclinación de la tubería para configurar la sección de pruebas. Las características anteriores en conjunto con el sistema de adquisición de datos y un sistema de tomografía digital, colocan al laboratorio de flujos multifásicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM a la par de otros laboratorios encontrados en universidades como University of Tulsa (USA) e Imperial College London (UK).

Experimentos bifásicos líquido-gas

Hasta el momento se han realizado dos tipos de experimentos multifásicos en el circuito antes mencionado, el primer tipo corresponde a experimentos bifásicos líquido-gas donde las velocidades superficiales del líquido empleadas se encuentran dentro del intervalo $0.1\text{ m/s} \leq V_{s_L} \leq 1.1\text{ m/s}$. Para el caso de las velocidades superficiales del gas, los valores obtenidos durante los ensayos caen en el rango de: $0.4\text{ m/s} \leq V_{s_g} \leq 4.6\text{ m/s}$. Las combinaciones de flujos másicos de entrada propician la aparición del patrón de flujo intermitente en la sección de pruebas; las señales de presión típicas asociadas a este patrón de flujo se pueden apreciar en la figura 3.

Pruebas líquido-líquido

El segundo tipo de experimentos corresponde al caso del flujo bifásico líquido-líquido desarrolladas con el propósito de reproducir el efecto de una técnica híbrida de mejoramiento de flujo y de analizar su efecto en la caída de presión. La fase primaria utilizada fue glicerina pura con viscosidad cercana a 1 Pa s, el agente reductor de arrastre (DRA; Drag Reducer Agent) fue una mezcla agua-glicerina cuyas propiedades y comportamientos son semejantes a las del bio-reductor de viscosidad BRV®.

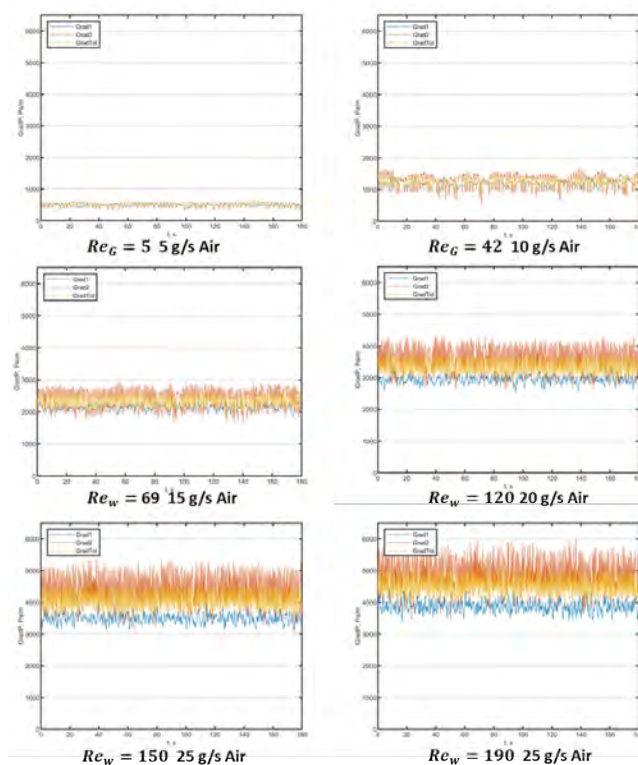


Figura 3. Señales típicas de experimentos bifásicos líquido-gas en patrón de flujo intermitente

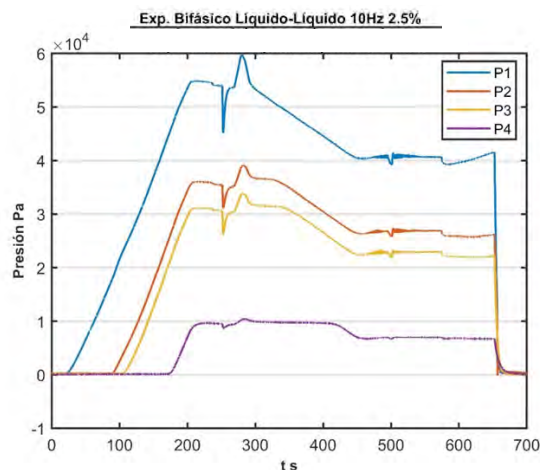


Figura 4. Señales de presión asociadas a un experimento líquido-líquido

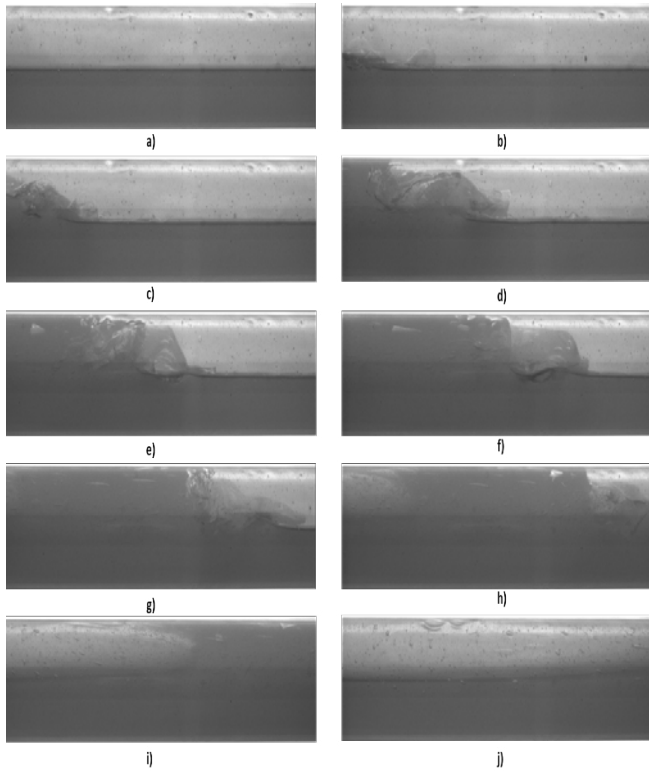


Figura 5. Flujo bifásico líquido-gas de alta viscosidad observado mediante cámara de alta velocidad

Identificación de Patrones de Flujo

En el campo del flujo multifásico es de especial interés la identificación del patrón de flujo que se origina con una combinación de fases determinada; para tal fin, el circuito experimental cuenta con dos técnicas no invasivas para la visualización de la disposición geométrica de las fases, ellas son: Tomografía digital resistiva y capacitiva, así como visualización por medio de video de alta velocidad; algunas de las imágenes obtenidas a partir de dichas técnicas de visualización se presentan en las figuras 5 y 6.

Es importante reiterar que en el mundo existen pocas instalaciones de esta índole, por ejemplo, el Laboratorio SINTEF en Noruega, y los laboratorios TUFFP de la Universidad de Tulsa, mismos que sirvieron como base para el diseño y construcción de este laboratorio en el IIUNAM. Como tal, se pueden extender estudios multifásicos hacia el área no sólo de transporte, sino de producción y manejo integral de mezclas incluyendo su efecto en medios porosos y transferencia de calor.

El proyecto presentado conjunta los esfuerzos y capacidades de varios investigadores del Instituto de Ingeniería, está liderado por el Dr. Arturo Palacio Pérez, cuenta con la participación activa de los doctores Alejandro Rodríguez Valdés y Enrique Guzmán Vázquez, además de la colaboración de becarios de distintos niveles.

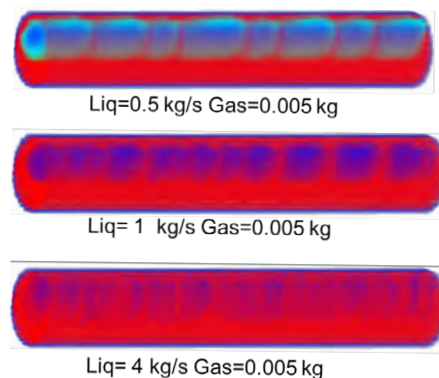


Figura 6. Visualización del patrón de flujo intermitente mediante tomografía digital

ESTUDIO DE INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA EN CONDUCTOS CIRCULARES

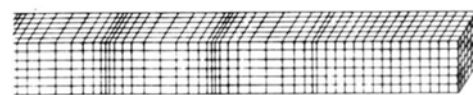
ALAN OLVERA, GERARDO JUÁREZ
Y ENRIQUE GUZMÁN

La interacción fluido-estructura se presenta en diversos procesos naturales⁵. En breve, ésta se refiere a la interrelación dinámica producida entre un sólido deformable y un flujo interno o externo. Algunos casos concretos incluirían, por ejemplo, los tremores ocasionados por el flujo magmático en el interior de conductos volcánicos, el transporte de hidrocarburos en sistemas de producción, el flujo sanguíneo en el sistema circulatorio, el nado de un pez e incluso el aleteo en las superficies de control de los aviones⁴. Debido a la complejidad del fenómeno, una buena parte de las investigaciones contemporáneas son de tipo experimental y numérico^{8,10}. No obstante, los tratamientos de tipo teórico constituyen una imprescindible vía de análisis.

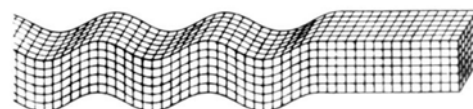
El trabajo en curso se refiere a los efectos inducidos por un flujo pulsante en un conducto elástico de sección circular⁷. El objetivo es obtener un modelo analítico que permita relacionar las deformaciones de la pared externa del conducto con las características del flujo. Aunque la aplicación que motiva el estudio concierne específicamente a los flujos en conductos volcánicos, la generalidad del modelo permitiría, en principio, estudiar casos interesantes en otras ramas; por ejemplo, en la ingeniería biomédica, la ingeniería aeronáutica, la ingeniería hidráulica y la ingeniería petrolera. Como paso previo a la elaboración de un modelo sofisticado que contemple los efectos viscosos y el espesor finito del tubo, aquí se considera el modelo simplificado de Womersley¹².

Los efectos físicos que se busca cuantificar están determinados por la naturaleza de las ondas que se propagan a través del fluido y del conducto. Estas ondas se manifiestan como perturbaciones de las propiedades de ambos medios. En función de su dirección de propagación, las ondas en cuestión pueden ser clasificadas como³: ondas longitudinales (ondas P), ondas transversales (ondas S) y ondas superficiales. Las ondas longitudinales producen desplazamientos paralelos a la dirección de propagación (Fig. 1a).

En contraste, las ondas transversales (Fig. 1b) verticales y horizontales provocan desplazamientos perpendiculares a la dirección de propagación. Las ondas superficiales, por su parte, se propagan a través de la interfase que separa dos



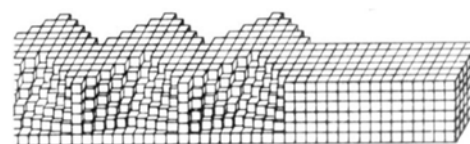
a) Onda longitudinal P



b) Onda transversal S



c) Onda superficial de Rayleigh



d) Onda superficial de Love

Figura 1. Características de los tipos de onda de mayor interés (tomado de Castillo Cruz, 2005)

medios. Cuando los desplazamientos son normales a la superficie se producen ondas de Rayleigh (Fig. 1c), mientras que los paralelos producen ondas de Love (Fig. 1d). La interacción del fluido con el conducto que lo confina implica la coexistencia de todos estos tipos de onda. Por ejemplo, las ondas longitudinales se manifiestan en el fluido, las ondas longitudinales y transversales en el sólido, y las ondas superficiales en las paredes interna y externa del conducto. En principio, los efectos físicos de estas ondas se podrían registrar mediante acelerómetros, o a través de sensores piezoeléctricos colocados en la pared externa del conducto.

El caso que nos ocupa concierne a un flujo viscoso confinado por un tubo, sobre el que actúa un gradiente de presión que varía periódicamente en el tiempo. En este breve artículo revisamos exclusivamente el caso límite en el que el conducto

es rígido. No obstante, este caso simplificado establece el punto de partida para elaborar modelos más sofisticados aptos para analizar conductos deformables. Esta aproximación reduce enormemente, tanto la complejidad experimental (con sus respectivos costos), como la de modelado. Para estas condiciones se obtuvo el modelo base a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes¹¹.

La validación correspondiente se llevó a cabo en un dispositivo experimental que consta de una bomba peristáltica, un sistema de tuberías transparentes de acrílico y dos depósitos de fluido, uno que alimenta al sistema y otro de descarga (Fig. 2). La bomba contiene tres rodillos (con separación angular de 120°) que, al rotar sobre una manguera fija, forman una cavidad progresiva que impulsa al fluido en la dirección del movimiento. El motor a pasos se controla a través de un micro-controlador Arduino. Por último, la sección de pruebas está compuesta por un tubo de acrílico de 0.0075 m de diámetro interno. Todo el sistema fue nivelado mediante soportes con abrazaderas metálicas.

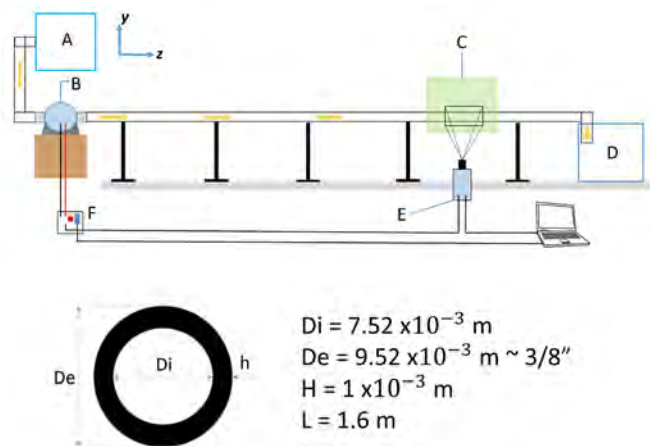


Figura 2. Arreglo experimental A: Depósito de alimentación, B: Bomba peristáltica, C: Hoja láser, D: Depósito de descarga, E: Cámara de alta velocidad, F: Circuito de control

El fluido de trabajo, constituido por una mezcla diluida de glicerina y agua a 50 % V, permitió realizar los experimentos de interés en el régimen laminar. A fin de medir el campo de velocidades se agregaron al fluido partículas huecas de vidrio (con un diámetro medio de 10 μm) recubiertas de plata. Una hoja de luz láser, cuya longitud de onda mide 532 nm, se hizo pasar a través de la sección de visualización para iluminar

las partículas (Fig. 3). La reflexión causada por las partículas en movimiento permitió que sus respectivas trayectorias fueran registradas por una cámara de alta velocidad Phantom Miro-321S.

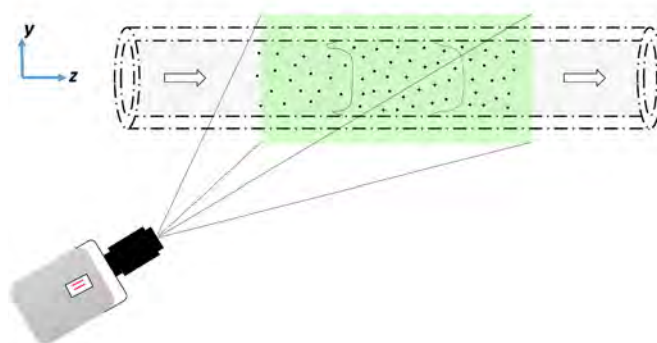


Figura 3. Método de iluminación con una hoja láser

Pares consecutivos de fotogramas sirvieron, entonces, para determinar las posiciones relativas de las partículas. Con base en ellas y en los tiempos entre imágenes (la tasa de muestreo fue de 2000 cuadros por segundo) se calculó el campo de velocidades en la región de visualización. La técnica descrita se conoce como velocimetría por imágenes de partículas (o PIV por sus siglas en inglés)⁹.

La validación global del modelo se muestra en la figura 4. Las gráficas representan los flujos volumétricos experimental (curva negra de puntos) y teórico (curva roja). Esta última está dada, en forma aproximada, por los primeros cinco términos de la expansión de Fourier. El acuerdo entre ambos flujos es razonablemente bueno. Cabe notar que las escasas validaciones reportadas en la literatura científica se concentran únicamente en este tipo de comparación. No obstante, en el presente caso también se decidió llevar a cabo una validación local (Fig. 5). En ella se analizó detalladamente el perfil de velocidades a través de varias secciones transversales. Todos los datos medidos se procesaron estadísticamente para cada posición radial, para cada tiempo, y para cada una de las secciones. Con la información obtenida se estimaron las bandas de incertidumbre experimental. De la misma manera se realizó una simulación de Monte Carlo, empleando la solución analítica, a fin de establecer las bandas de incertidumbre teóricas. La figura 5 muestra la comparación entre los perfiles de velocidad experimental y teórico, con sus respectivas bandas de incertidumbre.

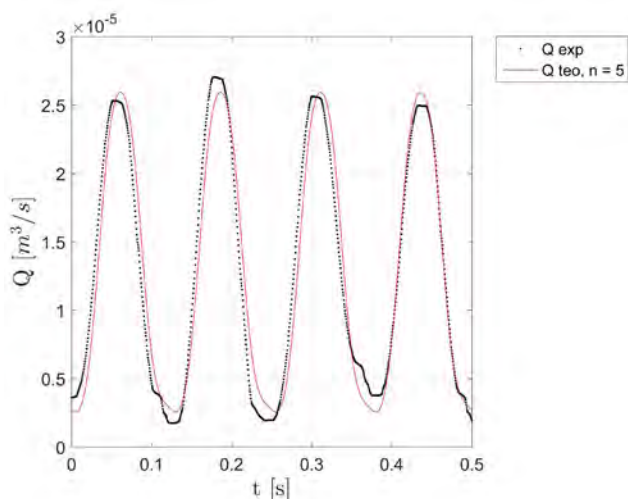


Figura 4. Validación global del modelo.
La línea roja representa la predicción teórica,
y la línea punteada negra los datos experimentales

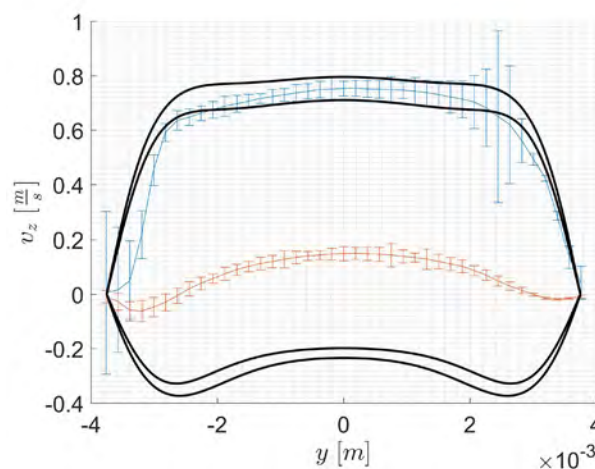


Figura 5. Validación local. El perfil de velocidades en la fase impulsiva se compara favorablemente con la predicción teórica. En la fase de retroceso del flujo se produce un desfase del perfil, probablemente ocasionado por limitaciones asociadas a la técnica PIV

Existe un buen acuerdo para la fase impulsiva del flujo (con velocidades positivas). Sin embargo, debido a las dificultades técnicas para medir las velocidades cerca de las paredes del conducto, así como a los efectos inerciales de las partículas trazadoras, los perfiles correspondientes al flujo de retroceso (con velocidades negativas) difieren ostensiblemente. Además de la asimetría en las bandas de incertidumbre, se introduce un desfase significativo en las velocidades durante el reflujo y un incremento en las incertidumbres. Se concluye que estos efectos espurios distorsionan artificialmente la medición de las propiedades locales del flujo de retroceso. Por tal motivo, se da por buena únicamente la validación de la parte impulsiva del flujo.

En una etapa posterior del estudio se llevará a cabo una validación similar para el modelo refinado. Hasta donde sabemos, la solución analítica desarrollada para ese modelo es distinta de las que ya han sido reportadas en la literatura científica. Las principales limitaciones de los modelos existentes es que consideran: a) flujos ideales en conductos sin espesor ⁶,

b) flujos ideales en medios estratificados ⁸, y c) flujos viscosos interactuando con membranas ^{10,12}.

El modelo refinado considera un sólido isótropo. Además, es capaz de predecir los desplazamientos de las paredes con respecto a los radios neutros (es decir, los que corresponden al estado sin deformación). Sin duda, lo más destacable es que el modelo refinado predice las propiedades de las diversas ondas descritas anteriormente. Desde el punto de vista experimental las dificultades principales para su validación son: a) la imposibilidad de emplear la técnica de PIV, b) determinar la longitud de las ondas que se propagan, c) discriminar las ondas debido a la direccionalidad de los sensores piezoeléctricos, y d) la dificultad de caracterizar todas las magnitudes físicas involucradas (por ejemplo, los módulos de Young y de Poisson).

Estas dificultades no son insorteables y se espera que, una vez validado, el modelo sirva para estudiar la sismología volcánica. El objetivo es relacionar las mediciones hechas en campo con los fenómenos de flujo en el interior del volcán. |

Referencias

1. Arfken, G. B.; Weber, H. J. (2005). *Mathematical Methods for Physicists*. Academic Press. EE UU.
2. Sakhr, J.; Chronik, B. A. (2018). Solving the Navier-Lamé Equation in Cylindrical Coordinates Using the Buchwald Representation: Some Parametric Solutions with Applications. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 10(4), p. 1025-1056.
3. Eringen, A. C.; Erdogan, S. S. (1974). *Elastodynamics Volume I: Finite Motions*. Academic Press. EE UU.
4. Fung, Y.C. (1993). *An Introduction to the Theory of Aeroelasticity*. Dover Publications Inc. EE UU.
5. Galdi, G.; Rannacher, R. (2010). *Fundamental Trends in Fluid-Structure Interaction. Contemporary Challenges in Mathematical Fluid Dynamics and Its Applications*, 1. World Scientific. Singapur.
6. Lin, T. C.; Morgan, G. W. (1956). Wave Propagation through Fluid Contained in a Cylindrical, Elastic Shell. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(6), p. 1165-1176.
7. Païdoussis, M. P. (2014). *Fluid-Structure Interactions Volume 1: Slender Structures and Axial Flow*. Academic Press. Reino Unido.
8. Perton, M.; Sánchez-Sesma, F. J. (2012). Numerical and Ultrasonic Experimental Simulations of Elastic Wave Propagation Around a Hollow Cylinder. *Journal of Computational Acoustics*, 13(39).
9. Raffel, M. *et al.* (2007). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer. EE UU.
10. Tambaca, J. et al. (2005). Effective model of the fluid flow through elastic tube with variable radius. *Grazer Math. Ber.*
11. Womersley, J. R. (1955). Method for the Calculation of Velocity, Rate of Flow and Viscous Drag in Arteries when the Pressure Gradient is known. *Journal of Physiology*, 127(3), p. 553-563.
12. Zamir, M. (2000). *The Physics of Pulsatile Flow*. Springer. EE UU.

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



InstitutoIngenieríaUNAM



IIUNAM



IIUNAM



IIUNAM



IINGENUNAM

REUNIÓN INFORMATIVA ANUAL 2020

Como ya es costumbre, la Reunión Informativa Anual se llevó a cabo los días 22, 23 y 24 de enero. El primer día, la Subdirección de Estructuras y Geotecnia presentó catorce ponencias que son tan sólo una muestra de los trabajos de investigación que se están desarrollando en esta área. Además de la presentación de varios carteles.

El 23 de enero le correspondió al personal de la Subdirección de Electromecánica exponer los resultados de quince de las investigaciones realizadas a lo largo de 2019.

El último día investigadores, técnicos académicos y becarios de la Subdirección de Hidráulica y Ambiental, junto con el personal de las sedes foráneas de Juriquilla en Querétaro y de Sisal en Mérida mostraron los resultados de los estudios elaborados recientemente. También se exhibieron carteles de Ambiental y de las sedes Sisal y Juriquilla.

La Dra. Rosa María Ramírez, como encargada del despacho de la Dirección, agradeció la presencia de los asistentes e invitó al personal del Instituto de Ingeniería a trabajar en equipo para potenciar nuestras capacidades con el fin de que este Instituto siga siendo referencia en el campo de las ingenierías.

Por su parte, el Dr. Efraín Ovando, subdirector de Estructuras y Geotecnia, invitó a la comunidad a reflexionar para buscar nuevas maneras de relacionarse con la sociedad. Afirmó que esta reunión es una muestra del ingenio, seriedad y profesionalismo con el que labora el personal del IIUNAM.

El subdirector de Electromecánica Arturo Palacios felicitó al personal de su Subdirección porque han incrementado las líneas de investigación con temas de vanguardia. Recordó que el propósito de la RIA es conjuntar esfuerzos, incluso con el personal de otras coordinaciones a fin de servir a nuestra sociedad.



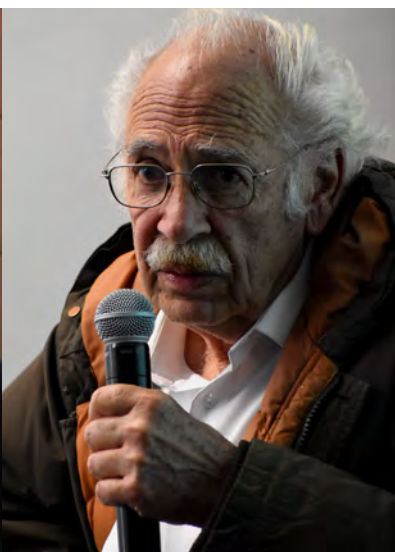
Premio Tesis IIUNAM 2019

Moisés Berezowsky, subdirector de Hidráulica y Ambiental, agradeció la participación de los ponentes y afirmó que la RIA es una oportunidad para mostrar las fortalezas que tienen estos grupos de investigación.

Finalmente, Germán Buitrón en su calidad de subdirector de las Unidades Académicas Foráneas resaltó la importancia de que las sedes foráneas interactúen con las Coordinaciones de Hidráulica y Ambiental.

En esta ocasión, se entregaron los reconocimientos a las mejores tesis de Maestría y de Doctorado del IIUNAM 2019. Nuestras felicitaciones a: Mauricio Flores Cortés, quien recibió el Premio Tesis IIUNAM 2019 en la categoría de maestría, trabajo desarrollado bajo la supervisión de Dr. Guillermo Quijano Govantes, quien recientemente forma parte del personal del IIUNAM. Del mismo modo, nos da mucho gusto que Pablo David Quinde Martínez se hiciera acreedor al Premio Tesis IIUNAM 2019, en la categoría de Doctorado. El Dr. Eduardo Reinoso Angulo fue el director de esta investigación.

A todos ellos ¡enhorabuena!



Se invita a la comunidad
académica del IIUNAM al



CAFÉ ACADÉMICO

Viernes
27
marzo 2020

12:00 h

En la Torre de Ingeniería,
1^{er}. piso

Espero contar con su presencia
DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA
Directora



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM