

## **Avances del grupo iiDEA sobre el desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía dentro del CeMIE-Geo**

**Héctor Miguel Aviña Jiménez<sup>1</sup>, Luis Alberto Flores Alcalá<sup>2</sup>, Oscar Inti Ramos Campos<sup>3</sup>**

Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D.F.

Correo: [havinaj@iingen.unam.mx](mailto:havinaj@iingen.unam.mx)<sup>1</sup>, [lfloresa@iingen.unam.mx](mailto:lfloresa@iingen.unam.mx)<sup>2</sup>, [oramosc@iingen.unam.mx](mailto:oramosc@iingen.unam.mx)<sup>3</sup>

### **Resumen**

En el presente artículo se hace una revisión de las diferentes actividades que se han llevado a cabo dentro del grupo iiDEA enfocado al desarrollo de tecnología para el aprovechamiento de la baja entalpía en México. Se mencionan las acciones técnicas, de logística, de vinculación, económicas, prácticas de campo, académicas y de investigación que el grupo se encuentra realizando para llevar a cabo la construcción y puesta a prueba en campo de tres prototipos: la Desaladora Modular Geotérmica (DMG), el Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI) y el Deshidratador Geotérmico de Alimentos (DGA). En cada uno de estos desarrollos se busca que todos, o al menos la mayoría de los equipos sean diseñados y construidos por los participantes del proyecto, cumpliendo de esta forma uno de los objetivos del CeMIE-Geo que es formar recursos humanos que satisfagan las necesidades emergentes de las aplicaciones de la energía geotérmica.

*Palabras clave:* Proyectos de baja entalpía, desalación, evaporación instantánea, deshidratación de alimentos, geotermia, usos directos.

## **Progress in the technological development of low-enthalpy geothermal energy exploitation, by the iiDEA Group as part of CeMIE-Geo**

### **Abstract**

A review of the different activities accomplished by the iiDEA Group is presented, focusing on the technologic development for low-enthalpy geothermal energy exploitation in Mexico. Several areas are covered: technical approaches, logistics, entailment, economic analysis, field practices, academic links, and research. These actions converge together in the construction and field testing of three prototypes: Modular Geothermal Desalination Plant (MGDP), Flash Evaporation Binary Cycle (FEBC) and Geothermal Food Dehydrator (GFD). It is intended that all, or at least most of the equipment is designed and built by the project members, thus, fulfilling one of the objectives of the CeMIE-Geo, which is the professional growth of human resources, in order to meet the emerging needs of geothermal energy applications.

*Keywords:* Low-enthalpy projects, desalination, flash evaporation, food dehydration, geothermal energy, direct uses.

### **Abreviaturas**

UNAM – Universidad Nacional Autónoma de México

II – Instituto de Ingeniería de la UNAM

iiDEA – Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas

DMG – Desaladora Modular Geotérmica

CBEI – Ciclo Binario de Evaporación Instantánea

DGA – Deshidratador Geotérmico de Alimentos

CeMIE-Geo – Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica  
CONACyT – Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología  
SENER – Secretaría de Energía  
CENISA – Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados  
ETU – Especialistas en Turbopartes, S.A. de C.V.  
CCADET – Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico  
UPBC – Universidad Politécnica de Baja California  
UABC – Universidad Autónoma de Baja California  
CNEER – Congreso Nacional de Estudiantes de Energías Renovables  
RTDs – Resistive Temperature Detectors  
CFD – Dinámica de Fluidos Computacionales  
FI – Facultad de Ingeniería  
FQ – Facultad de Química  
FD – Facultad de Derecho  
FC – Facultad de Ciencias  
FES Zaragoza – Facultad de Estudios Superiores Zaragoza  
IPN – Instituto Politécnico Nacional (IPN)  
UMB – Universidad Mexiquense del Bicentenario  
PARA – Programa de Alto Rendimiento Académico  
CGLA – Central Geotermoeléctrica Los Azufres

### ***Nomenclatura***

kW – kilowatt

MW – Megawatt

mm – milímetro

## **INTRODUCCIÓN**

En este documento se describen los avances del grupo iiDEA del Instituto de Ingeniería de la UNAM, dentro del Centro Mexicano en Innovación en Energía Geotérmica, CeMIE-Geo, que es financiado por el Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética CONACyT-SENER. El grupo iiDEA, coordinado por el Director del Instituto de Ingeniería UNAM, se enfoca en identificar y evaluar las fuentes alternas de energía, para desarrollar soluciones que permitan resolver la problemática de escasez de agua, energía y alimentos perecederos. El grupo cuenta con tres proyectos principales: una Desaladora Modular Geotérmica (DMG), un Ciclo Binario de Evaporación Instantánea (CBEI) y un Deshidratador Geotérmico de Alimentos (DGA), cada uno de ellos diseñado para aprovechar recursos geotérmicos de baja entalpía.

## **LOGÍSTICA**

Desde el inicio del grupo iiDEA fue importante plantear una forma de organización que permitiera un crecimiento integral del equipo, separando el grupo en áreas especializadas que se dedican a solucionar problemas específicos y designando encargados de proyecto jóvenes. Hay actualmente un encargado de trabajo por proyecto (DMG, CBEI y DGA). Los grupos especializados abarcan cuestiones técnicas como son los termofluidos, aspectos geoquímicas, diseño, hasta la formación de planes de negocio de los dispositivos y propiedad intelectual. En la Figura 1 se puede observar el organigrama del grupo iiDEA.

## VINCULACIÓN Y CONVENIOS

Se consolidaron vinculaciones con instituciones educativas, académicos y empresas privadas, cada una con diferentes objetivos, que aportan al grupo conocimiento, asesoría y trabajos especializados.

Con el objetivo general de desarrollar sistemas de recubrimientos que brinden protección contra la corrosión e incrustación a dispositivos térmicos con aplicación en ambientes geotérmicos de baja entalpía, se afianzó un convenio entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Otro de los objetivos de este convenio es analizar tres sistemas de protección para aplicaciones geotérmicas con baja temperatura: sol-gel, galvanizado modificado y polímeros de alta resistencia, trabajos dirigidos por Miguel Ángel Hernández Gallegos y coordinados por Arturo Barba Pingarrón.

Para el CBEI se consolidó un convenio con Especialistas en Turbopartes, S.A. de C.V. (ETU), con el propósito de desarrollar una microturbina de 10kW para uso de vapor de baja entalpía. Entre las dos partes se plantearon los siguientes objetivos:

- Diseño y fabricación de un prototipo de microturbina para uso de vapor de baja entalpía con capacidad de 10kW,
- Vinculación con la industria especializada en diseño y manufactura de turbomaquinaria y turbopartes,
- Transferencia tecnológica entre el II-UNAM y ETU.
- Consultoría y asesoría tecnológica especializada en turbomaquinaria.

Al concluir el convenio, ETU y el II tendrán una turbina de 10kW, con un reporte de pruebas realizadas en sitio y el diseño básico para la escalabilidad de la turbina a 30kW. Los trabajos son coordinados por Gilberto Efraín Valle Meléndez y el Ing. Victor Zenón Arroyo.

Con respecto a las labores del DGA se realiza una colaboración de trabajo académico e innovación tecnológica aplicada con la Facultad de Química de la UNAM, en el que se evaluará el producto jitomate deshidratado a diferentes regímenes operativos. Incluirá análisis microbiológico, sensorial y fisicoquímico con la finalidad de establecer cuáles son los parámetros de secado que permiten asegurar la calidad de cada producto. Estos estudios son liderados por Patricia Severiano Pérez, responsable del área de Evaluación Sensorial, y Olga Velázquez Madrazo, encargada del área de Microbiología de Alimentos, y Eduardo Pérez González.

En el área de instrumentación y control para los tres proyectos, existe otro convenio de colaboración directa, éste acordado con el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) para asesoría, consulta y préstamo de equipo y material, implementación y caracterización de sensores, integración de un sistema de monitoreo de variables físicas para los equipos del proyecto, diseño de un sistema global de adquisición de datos y finalmente el diseño de un sistema de control para cada sistema. Este convenio es implementado por Álvaro Núñez Flores y Miguel Ángel Benítez Torreblanca.

Por otro lado, hay un convenio general con la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y con la Universidad Politécnica de Baja California (UPBC). Con ambas se cuenta con un acuerdo de apoyo en instalaciones y becarios, y con la UPBC en particular se está trabajando en la construcción del prototipo de la DMG.

## INVESTIGACIÓN

Durante el periodo precedente se trabajó en el desarrollo y proceso de publicación para los siguientes tres artículos:

- Alternativas de producción de vacío para plantas desaladoras térmicas no convencionales
- Comparación energética entre los ciclos CBEI y un binario convencional
- Análisis del acoplamiento de sistemas de generación eléctrica y desalación de agua de mar, vía los flujos geotérmicos de rechazo del sistema PWG y del flujo de alimentación del sistema MED-LE empleando recursos geotérmicos de baja entalpía.

En cada uno de ellos se describen las innovaciones tecnológicas que presenta el grupo iiDEA para la DMG y para el CBEI.

## ACCIONES TÉCNICAS

Se han adoptado diversas acciones técnicas para la resolver la problemática principalmente en la operación de los prototipos de laboratorio. Se mencionan las más significativas para el avance de los proyectos.

Iniciando con el CBEI, se realizaron pruebas en la turbina diseñada para este ciclo, a fin de identificar la incidencia del flujo de aire en los álabes del rotor. En él se observó que el flujo de aire impacta a 7.8 mm de la base del álabe, cuya altura es de 10mm. Otro punto importante a resaltar es que el flujo se desvía ligeramente por encima de los álabes.

Con las pruebas de trazadores de flujo se propuso: manufacturar una extensión al eje del rotor, con el fin de adaptar un codificador rotario o *encoder*<sup>1</sup>; iniciar el diseño del *encoder*, con el objetivo de tener un registro de las revoluciones de la turbina a cada instante; y diseñar la cámara de medición del *encoder*. El objetivo de registrar medidas de presión y revoluciones a cada instante es construir curvas de operación del dispositivo.

De forma paralela, la instrumentación realizada en el CBEI comenzó a partir de la determinación de los puntos críticos a monitorear dentro del ciclo. Para ello se tomó como antecedente el análisis termodinámico realizado previamente por el área de termofluidos. En consecuencia, se realizó la selección de sensores para cada variable física considerando, entre otras cosas, rango, resolución, limitaciones de operación, precisión y costo. La conclusión de esta selección fue el uso de RTDs (*Resistive Temperature Detectors*), medidores de flujo de turbina y transductores de presión piezo-resistivos. Una vez adquiridos se obtuvo su modelo característico. En una etapa paralela se diseñó una fuente de alimentación, para finalmente integrar el sistema anterior a una tarjeta de desarrollo *Arduino* sincronizada con el software *PLX-DAQ*.

Con respecto al DGA se está optimizando el proceso de deshidratado mediante el análisis de la distribución de aire caliente dentro del equipo, con ayuda de la dinámica de fluidos computacional

---

<sup>1</sup> Un codificador rotatorio o *encoder* suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor. Hay dos tipos principales: absoluto e incremental (relativo).

(CFD), en tres propuestas de diseño diferentes. Con ello se obtuvo información importante como la distribución del aire y su temperatura dentro de todo el dominio. De la primera simulación se observó que el ingreso del aire a la cámara de alimentos era pobre debido a la dirección que tomaba el fluido después del choque con el suelo. Se observó también que hubo recirculación debido a la acumulación de aire, pero se logró reducir en las otras simulaciones.

Se simuló una forma viable para la configuración de las ranuras, lo que facilitó el ingreso mediante la inclinación de 8 grados de la pared. También se obtuvo el número idóneo de ranuras, ya que si se consideraban más en algunas no había ingreso de aire. De la primera simulación también se apreció que la extracción era adecuada para el flujo que ingresaba a la cámara, porque la temperatura era uniforme. Sin embargo, al incrementar la cantidad de aire comenzó a estancarse el fluido, lo cual puede representar problemas en los alimentos por estar en diferentes zonas del deshidratador. La Figura 2 muestra la distribución de la magnitud de la velocidad en el plano longitudinal y vectores de velocidad mediante CFD.

Con relación a la DMG, se identificó como principal problemática a resolver el sistema de vacío de las cámaras, siendo este rubro uno de los más difíciles de conseguir tecnológicamente hablando. Para lograrlo se han estado realizando pruebas experimentales con un eyector a diferentes aperturas, para caracterizar las presiones vacuométricas en el condensador. Con estas pruebas se busca redimensionar el diseño del sistema de vacío. Actualmente se trabaja en la manufactura de un banco de tubos para pruebas de corrosión e incrustación mineral y biológica, con lo que se podrán intercambiar diferentes matrices de tubos y diferentes métodos sistemas de protección contra la corrosión e incrustación de minerales para evaluar la durabilidad, tiempos de mantenimiento y vida de diferentes sistemas.

Uno de los resultados colaterales de esas acciones técnicas, es que hasta el momento se han realizado siete trabajos de tesis, dos de maestría y cinco de licenciatura, en los que se presentan los desarrollos tecnológicos y científicos y las principales áreas de oportunidad de los diferentes proyectos.

Las tesis de licenciatura competen a los tres proyectos. Una de ellas se titula “Diseño de un Sistema Deshidratador de Alimentos Geotérmico de Baja Entalpía”, de Eduardo Pérez, y propone el dispositivo *per se* encargado de deshidratar los alimentos así como la problemática debida al desperdicio de alimentos. Por otra parte, se realizaron dos tesis relativas al CBEI. La primera es “Análisis del Acoplamiento de los Elementos del CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea)”, de Diego García, donde se realizó el cálculo de pérdidas reales en las tuberías de un ciclo binario de evaporación instantánea, y una vez que se obtuvo se presentó una propuesta para la instalación de bombas a diversas presiones que contrarresten las caídas de presiones a lo largo de las tuberías para obtener una mayor eficiencia en el prototipo del CBEI. En el segundo trabajo se dieron a conocer los diferentes sistemas de separación actualmente desarrollados, con la finalidad de analizar y seleccionar el equipo adecuado para obtener vapor saturad, así como la implementación de un innovador sistema de generación de vapor. Este sistema se implementará en un ciclo geotermoeléctrico propuesto para el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja entalpía, cuyo título fue “Diseño y Construcción de un Separador de Flujos para un Ciclo de Generación Geotermoeléctrica”, de Karina Sierra. Finalmente, las últimas dos tesis de licenciatura se desarrollaron en relación con la desaladora. Fueron trabajos de dos becarios de Mexicali, de la Universidad Autónoma de Baja California, titulados “Diseño del Sistema de Vacío para una Desaladora Modular Geotérmica” y “Propuesta de Diseño del Intercambiador de Calor para la Segunda Cámara de una Desaladora Modular Geotérmica de Baja Entalpía”, preparados por Jesús Díaz y Manuel Hernández, respectivamente.

Los dos trabajos de tesis de maestría se enfocaron en el desarrollo científico en áreas de oportunidad poco exploradas a la fecha. Uno de ellos, “Simulación Numérica del Flujo en el Rotor de una Microturbina de Vapor que se Acoplará a un Ciclo de Generación Geotermoeléctrica” fue preparado por Jonathan Hernández y evalúa el desempeño de la propuesta del rotor de la turbina que operará en el ciclo binario, validando la geometría de los álabes y cuantificando, mediante simulaciones numéricas, los parámetros involucrados en la dinámica del fluido de trabajo. El otro trabajo es “Desarrollo y Caracterización de Recubrimientos para Intercambiadores de Calor Empleados en Instalaciones Geotérmicas”, de Óscar Inti Ramos, y tiene como objetivo principal desarrollar un recubrimiento híbrido (orgánico-inorgánico) hidrofóbico para recubrir sistemas metálicos utilizados en sistemas de intercambio de calor, expuestos a fluidos geotérmicos. Este recubrimiento deberá tener la capacidad de aumentar la vida útil de los componentes metálicos al reducir notablemente la velocidad de corrosión tanto a temperatura ambiente como a temperatura del fluido geotérmico de baja entalpía.

## PRÁCTICAS DE CAMPO

Parte de los objetivos estratégicos del grupo iiDEA dentro del CeMIE-Geo es la innovación de tecnología para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía. Para ello se han realizado una serie de visitas técnicas y prácticas de campo con distintos fines específicos. La primera visita técnica fue a la Central Geotermoeléctrica Los Azufres (CGLA), Michoacán, en agosto de 2014, y tuvo como finalidad:

- Visitar un pozo de producción y conocer la metodología empleada para la evaporación flash en la industria geotermoeléctrica nacional (placa orificio y separador de flujos), así como la selección de materiales, dispositivos, ductos e instrumentación necesaria para el transporte, regulación y control de vapor.
- Conocer el diseño del intercambiador de calor utilizado para algunos usos directos de la geotermia, el tipo de calefacción del aire empleado, el mantenimiento del intercambiador de placas que se utiliza y la infraestructura requerida para la puesta en marcha del deshidratador de alimentos que fue instalado en la CGLA en el año de 1995, así como las condiciones históricas operativas de los dispositivos.
- Realizar una visita general a las plantas de 25 MW y de 5 MW.
- Analizar el sistema de enfriamiento utilizado en las plantas de condensación y en las de ciclo binario verificando tipos de condensador y torres de enfriamiento, acoplamientos entre el condensador y las torres de enfriamiento, rangos y condiciones de operación.
- Identificar el tipo de sellos utilizados en las turbinas de vapor geotérmicas, así como conocer el diseño de la zona de expansión, tipo de raíz o ensamble en los álabes, acoplamiento con el generador, sistemas de lubricación, arranque y cimentación de la turbina con respecto a las vibraciones. Una fotografía de la placa orificio para regular presión en boca de pozo la podemos observar en la Figura 3.

De manera paralela a la visita a la CGLA se realizó una entrevista con el responsable de la planta híbrida de generación eléctrica solar-geotérmica instalada en el poblado de Simiarao, municipio de Zinapécuaro, Mich. El objetivo fue conocer los datos de operación de la planta de ciclo binario, del pozo geotérmico y del sistema de colectores solares.

Subsiguientemente se visitó el Complejo Termoeléctrico Presidente Adolfo López Mateos, ubicado en Tuxpan, Veracruz, en octubre de 2014. El objetivo fue conocer en más a detalle las plantas desaladoras que operan ahí, visitar las cámaras desaladoras por dentro, resolver dudas específicas respecto a



materiales, medidas generales de los equipos, tratamientos químicos, mantenimiento a equipos, instrumentación y sistemas de vacío.

Finalmente, en noviembre del mismo año se realizó un viaje a Mexicali, Baja California, con la intención de revisar los avances del grupo de trabajo en la UPBC respecto a la DMG, así como identificar y medir la temperatura en algunos pozos de agua caliente localizados por los ejidatarios de la zona de Laguna Salada. También se visitaron manantiales termales ubicados dentro del Cañón de Guadalupe, como se muestra en la Figura 4.

### **ASPECTOS PRESUPUESTALES Y DIVULGACIÓN**

Durante la primera etapa, el 18% del monto total destinado a recursos humanos fue destinado a 15 becarios de licenciatura y tesis. Se reservó el 13% para cuatro asistentes del proyecto, dos titulados de maestría y dos de licenciatura. El restante 67% fue destinado al pago de honorarios de seis especialistas con la experiencia necesaria para apoyar al proyecto.

Del recurso total de la primera etapa, el 17% se destinó a los gastos derivados de las visitas de campo y asistencia a congresos.

Una de las principales tareas que se ha decidido llevar a cabo es la difusión del trabajo realizado por el grupo iiDEA, no sólo para darlo a conocer sino también para atraer jóvenes estudiantes con interés en las energías alternas, especialmente la geotermia. Uno de los primeros medios de divulgación es la clase que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, titulada “Temas Selectos de Termodinámica, Aplicaciones de la Energía Geotérmica”. Esta materia se ha impartido ya durante tres años y es la principal fuente de captación de nuevos estudiantes, además de posibilitar la participación en ciclos de conferencias y pláticas académicas dentro de la universidad.

De forma paralela se abrió el programa de servicio social en el II, en el que han participado estudiantes de diferentes entidades, tanto de la propia UNAM como foráneas, incluyendo a las facultades de Ingeniería, Química, Derecho, Ciencias, la FES Zaragoza, la UPBC, UABC, IPN y UMB.

En septiembre del año pasado se realizó una Plática Informativa a estudiantes de la FI del Programa de Alto Rendimiento Académico (PARA). El PARA es una acción académica de nivel institucional que establece actividades de enseñanza y aprendizaje adicionales para aquellos estudiantes que de manera voluntaria así lo acepten. En esta plática se habló del grupo iiDEA y sus proyectos, con la finalidad de captar estudiantes de alto rendimiento.

Adicionalmente se presentaron trabajos de los 13 estudiantes del Grupo iiDEA en el Congreso Nacional de Estudiantes de Energías Renovables (CNEER), efectuado en noviembre de 2014 en el Instituto de Energías Renovables. Estos fueron los únicos trabajos relacionados con la energía geotérmica. Una de los estudiantes del grupo, Manuel Hernández, obtuvo el primer lugar en la modalidad de exposición oral.

Se elaboró además una cápsula informativa para el primer concurso de *podcast* organizado por el II UNAM con la finalidad de dar a conocer al público en general los proyectos que se están desarrollando. El *podcast* del grupo iiDEA explica de manera sencilla, clara y objetiva la utilidad del DGA en la sociedad, impactando de forma positiva en la economía de pequeños y medianos productores de alimentos. Este trabajo se elaboró bajo la supervisión de Héctor M. Aviña Jiménez, el líder del

proyecto Eduardo Pérez González y la asistencia técnica en producción y locución de Zaira E. Vázquez Espejo y Rosa Isela Percastre Cuenca.

Dentro de la serie “Instituto de Ingeniería: un mosaico de innovación” del programa de Energías Renovables, se habló sobre el uso de energías alternas (Geotermia), de la formación del grupo iiDEA y de los proyectos que se están desarrollando en el Instituto de Ingeniería (<http://mediacampus.cuaed.unam.mx/node/4767>).

En la revista del Instituto de Ingeniería se publicó un artículo que explica a detalle el CBEI (<http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/GacetaSeptiembre2014/Paginas/iiDEA.aspx>).

La página web del grupo iiDEA y sus redes sociales son actualmente el medio de divulgación más potente con el que se cuenta. En la página está toda la información relacionada con el grupo, mientras que en *Facebook* y *Twitter* se busca acercar al grupo a gente interesada en las energías renovables, y particularmente con la energía geotérmica. Se publican noticias sobre avances tecnológicos, energías renovables, medio ambiente, cuidado del planeta, además de eventos importantes del grupo (<http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/>, /IIDEA y @GrupoIIDEA) (Figura 5).

Por último, se ha obtenido el registro de la marca IIDEA, Desalación y Energías Alternas Instituto de Ingeniería-UNAM, para aparatos de calefacción, producción de vapor secado, ventilación, distribución de agua, servicios científicos y tecnológicos, diseño y desarrollo de equipos entre otras. La obtención de esta marca registrada fue una de las prioridades del grupo, ya que somos un grupo de trabajo que busca el desarrollo de nueva tecnología para el aprovechamiento de recursos de baja entalpía, y es importante tener protegidos dichos avances.

*(Figuras en las páginas siguientes)*



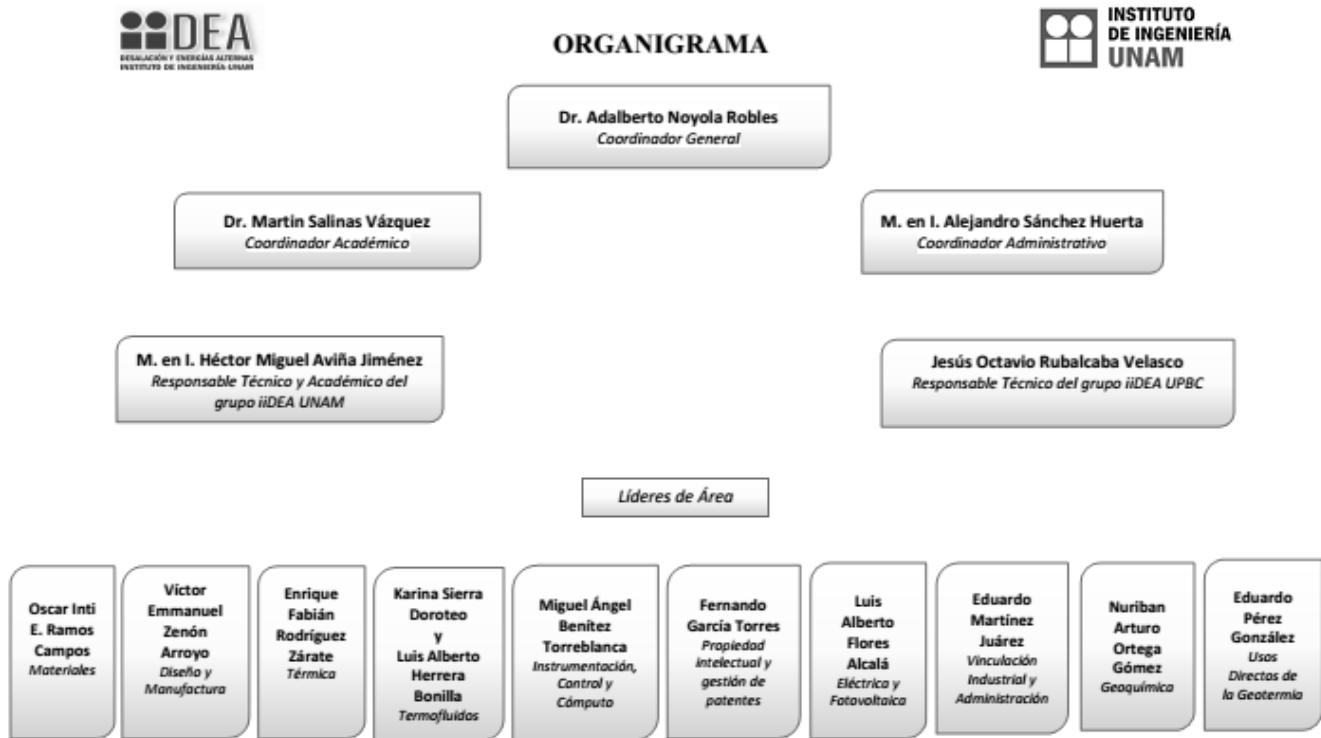


Fig. 1. Organigrama del grupo iiDEA

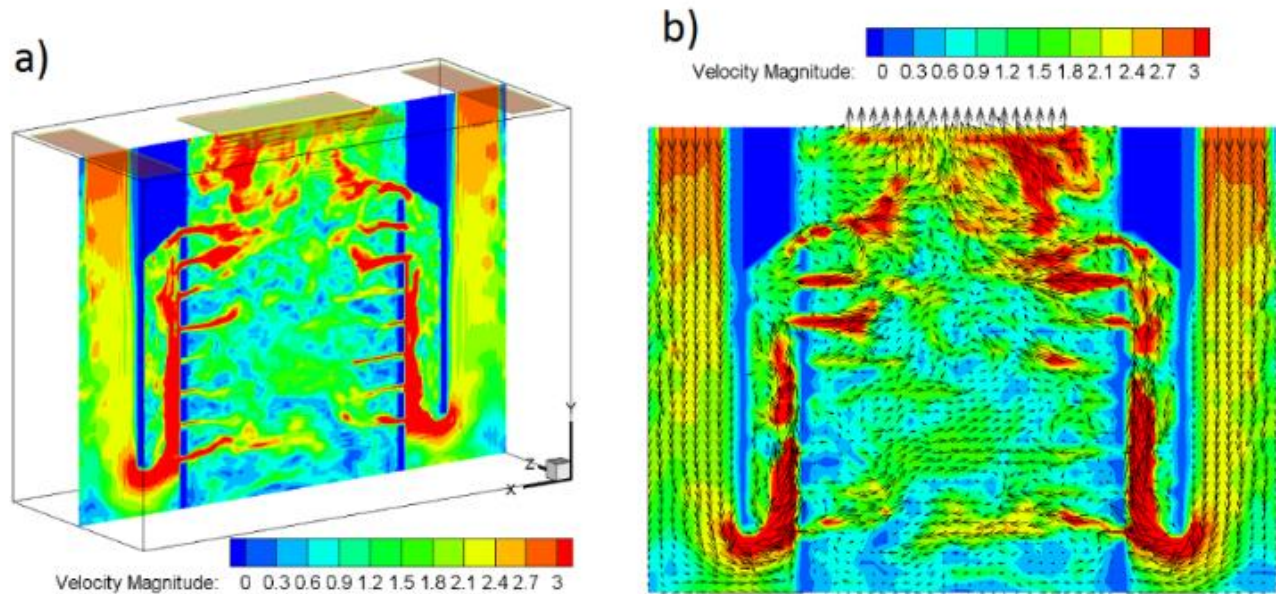


Fig. 2. a) Distribución de la magnitud de la velocidad en el plano longitudinal b) Vectores de velocidad.



Fig. 3.- Placa Orificio para Regular Presión en Boca de Pozo



Fig. 4.- Mediciones de Temperatura en Mexicali.



Fig. 5. Divulgación del Grupo iiDEA.