



ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA

ISSN 0719-3971

I3

Journal de
Investigación
en Pregrado

Nº5

INVESTIGACIÓN
INTERDISCIPLINA
INNOVACIÓN

Contenidos

Editores Jefes

Carlos Bonilla
Magdalena Walczak

Comité Honorario

Gloria Arancibia
Claudio Fernández
Sergio Gutiérrez
Ignacio Lira
César Sáez
Alfredo Serpell
Julio Vergara
Cristian Vial

Equipo Editorial

Diego Bertín
Joaquín Castellón
Cristina Contreras
Sebastián De Vidts
David Fuller
Vicente Gardulski
Ignacio Madrid
Sebastián Parr

Colaboradores

Marta Apablaza
Tamina Hepner

Coordinador Editorial

Rocío Céspedes
Nicole Díaz
Rolando Morales

Editores Adjuntos

Carla Arce
María José Cortés

Diseño y Diagramación

Sofía Dreyse

- 02 Palabras del editor
- 03 Estudiantes y el mundo de la investigación
- 04 ¿Sabías qué?
- 07 Selecciones de Ícaro
- 08 Oportunidades de investigación
- 10 I³ outlines
- 12 Ph.D. en la empresa
- 15 Interdisciplina
- 17 Investigación en pregrado
- 18 Investigación con impacto social
- 20 El descubrimiento por placer
- 22 Innovación en sus inicios
- 24 Proyectos de la escuela

INVESTIGACIONES DE LOS ALUMNOS

- 28 Análisis acústico de geodomas semiesféricos
- 36 Impacto del curado interno en pavimentos de hormigón
- 42 Secuestro de carbono en el suelo: cuantificación del potencial de captura en el suelo de un bosque patagónico
- 48 Estudio de propiedades térmicas de sustratos utilizados en cubiertas vegetales
- 55 Determinación de una política de mantenimiento oportunista: análisis en flota de camiones mineros
- 61 Diseño de horno de fundición de cobre
- 68 "Moisés": desarrollando un proyecto de diseño aplicado en ingeniería

Los nuevos investigadores



La nueva generación de investigadores se está desarrollando en un ambiente cada vez más competitivo, dinámico y lleno de nuevos requerimientos. Gran parte de estos cambios se deben a la interdisciplina, un estilo de investigación que caracteriza al desarrollo científico y tecnológico de los últimos años. Así, los nuevos investigadores deben estar preparados para adaptarse rápidamente a estos cambios y en el camino adquirir las competencias necesarias para desenvolverse en ambientes de trabajo cada día más diversos.

El escenario que enfrentan los nuevos investigadores trae a mi memoria una experiencia personal del año 2001. En esa fecha comenzaba mis estudios de doctorado en Estados Unidos, y sin haberlo presupuestado así, un mes después de haber llegado al país del norte me incorporaba al *Wisconsin Buffer Initiative (WBI)*. El *WBI* consistía en un esfuerzo colaborativo entre un grupo diverso de ciudadanos de Wisconsin y científicos de la Universidad de Wisconsin-Madison. Su principal objetivo era el desarrollo de un programa para controlar la contaminación de las aguas en el estado mediante el uso de la vegetación que crecía en la ribera de los ríos. Fue así como rápidamente me vi colaborando en un comité científico conformado por limnólogos, ecólogos, especialistas en vida acuática, agrónomos, ingenieros hidráulicos, hidrólogos, físicos de suelo, toxicólogos, economistas,

geógrafos y sociólogos. Además del comité científico, también debía interactuar con personal de agencias federales y estatales, organizaciones de productores agrícolas y grupos ambientalistas. Esto me obligó a desarrollar un lenguaje técnico acorde a un variado perfil de especialistas y me permitió apreciar el valor de cada uno de ellos para la obtención de los objetivos del proyecto.

Pasado el tiempo y viendo las cosas a distancia pienso en la lección que me dejó ese proceso de formación. Además del conocimiento propio del área del investigador, la ciencia moderna requiere de otras y nuevas habilidades. Es necesario ser capaz de combinar distintas disciplinas y ampliar las ventajas que cada una ofrece por separado. Se necesita no sólo la aplicación de la teoría en la práctica, sino que también es necesaria la integración de variadas áreas del conocimiento en un mismo trabajo. En síntesis, aprender sobre otras áreas del conocimiento promueve la formación de un profesional más completo, aumenta su capacidad para abordar desafíos de mayor envergadura y otorga una ventaja importante frente al resto en el trabajo diario.

En este nuevo escenario, el *Journal I3: Investigación, Interdisciplina, Innovación* constituye una excelente vitrina y fuente de motivación para ustedes los estudiantes. El *Journal* les permite conocer las investigaciones que están desarrollando sus pares en las distintas ramas de la ingeniería y les

ofrece un espacio formal para publicar sus trabajos en colaboración con especialistas de otras áreas. Por todo esto, y teniendo presente los desafíos que deberán enfrentar como nuevos investigadores, reciban todos una cordial invitación a participar de esta iniciativa. Es una oportunidad que no pueden dejar pasar.

Carlos Bonilla
Editor Jefe



De ganas a soluciones reales

Nuestro mundo moderno no sería posible sin tecnología y la tecnología no sería posible sin investigación. Con esta premisa, la Escuela de Ingeniería a lo largo de su historia ha acompañado el desarrollo tecnológico en diversas disciplinas con contribuciones basadas en investigación científica. Tradicionalmente, estas contribuciones se esperan de personas debidamente entrenadas en investigación, pero no existe ninguna razón ni formal ni cognitiva para mantener esta limitación. De hecho, investigar es una de las actividades donde la práctica hace al maestro. ¿Por dónde empezar entonces? Naturalmente por las ganas, pero para desarrollar las ganas y las ideas en conocimientos, productos y soluciones reales se necesitan herramientas. Nuestros programas de Pregrado y Postgrado ofrecen estas herramientas y con la nueva estructura curricular es posible ordenar las experiencias de investigación desde la más básica a la más completa y profunda.

Los cambios incrementales experimentados por el currículo de pregrado en 2009 y 2013 han unido la lógica de entregar capacidades junto con contenidos a los alumnos, acelerando la formación en ingeniería y permitiendo una mayor flexibilidad en los planes de estudio. En este contexto se introdujo la

iniciativa de Investigación en Pregrado (IPre), con la idea de involucrar tempranamente a los alumnos de pregrado con el descubrimiento y como una forma de que tomen en sus manos el protagonismo de su aprendizaje. En los cuatro años desde el inicio del programa hemos visto un incremento de 59% en el número de alumnos de ingeniería que han optado por tener una experiencia de investigación durante su pregrado. En esta etapa, nos cuentan los participantes, aprender y generar nuevo conocimiento es igual de motivante como el propio hecho de ver el uso de los conceptos recién vistos en clases.

Esta primera experiencia, con investigación en laboratorios y con equipos especializados, puede resultar en una solución completa de un problema real, pero también puede reforzar la curiosidad hacia querer descubrir más.

Los programas de postgrado están diseñados justamente para aquellas personas que desean profundizar sus conocimientos y contribuir en la generación de conocimientos nuevos. Los programas de Magíster en Ciencias de la Ingeniería combinan cursos e investigación en proporción balanceada, lo que permite profundizar la experiencia de IPre, transformándola en una contribución original al conocimiento. En los programas de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, la dedicación a la investi-

gación es dominante, lo que permite explorar estrechamente el tema de interés, llegar al límite de lo conocido y sobrepasarlo.

Bienvenidos al mundo de investigación.

Magdalena Walczak
Directora asociada de Postgrado

Mauricio López
Director de Pregrado

¿Sabías qué?

RESISTENCIA DE MATERIALES

Miguel Letelier, ingeniero de construcciones civiles de la Universidad de Lovaina e ingeniero civil UC impulsó las primeras pruebas sobre la resistencia de materiales realizadas en el país. El profesional, además, promovió la creación del Gabinete de Resistencia de Materiales y del Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile, que actualmente corresponde al DICTUC.



Puente Tocolma Narrows, 1940. Por la deformación que presenta en su trazado, es un ejemplo de la importancia del estudio de resistencia y elasticidad de los materiales. Fuente: Archivo Universidad Carlos III de Madrid.

Letelier es considerado uno de los académicos impulsores del crecimiento de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Gracias a la creación del primer Gabinete de Resistencia de Materiales, se llevaron a efecto las primeras pruebas de resistencia de materiales en el país en el año 1938, marcando un hito en el ámbito investigativo a nivel nacional y un aporte para las problemáticas de Chile, constantemente afectado por movimientos telúricos. La generación de estructuras más resistentes fue parte del trabajo realizado.

Además, impulsó la creación del Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la universidad, que actualmente corresponde a DICTUC, una empresa filial de la UC dedicada a la investigación y a la trans-

ferencia tecnológica desde la academia a diversos ámbitos productivos del país. El laboratorio de medición de resistencia de materiales de DICTUC tiene el nombre de Miguel Letelier en honor a los aportes que realizó a los estudios en ingeniería en la universidad y el país.

Entre las líneas de trabajo que se ejecutan en este laboratorio se encuentran: tecnologías en materiales de construcción, estudio de nuevos materiales, instrumentación de estructuras, diseño y ejecución de programas experimentales y diseño de ensayos.

Todo gran proyecto antes de materializarse empieza siendo un sueño. El llamado, por tanto, es a soñar y a atreverse a concretar nuevos proyectos.



Lo Contador cerca de 1900. Fuente: Pontificia Universidad Católica de Chile, gentiliza de Hans Mühr.

CAMPUS LO CONTADOR ANTES FUE UNA GRAN CASA COLONIAL

El campus Lo Contador aloja a la Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos UC y cuenta con más de 22 mil m² de terreno y una superficie construida de 16.844 m².

La historia de la casona de Campus Lo Contador se remonta al siglo XVIII, cuando don Francisco Antonio Avaria adquirió para su sobrina huérfana Mercedes Contador una serie de propiedades en las cercanías del cerro San Cristóbal. En el año 1780 se levantó una casa de adobe, que posteriormente se convertiría en un lugar para retiros espirituales. Años después, en 1930, los terrenos fueron vendidos al profesor y decano de la Facultad de Arquitectura UC, Sergio Larraín Moreno, quien convenció a las autoridades universitarias de la época de instalar la facultad en dicho lugar, hecho que ocurrió en 1959. El traslado de estudiantes no fue fácil, puesto que en aquella época el lugar estaba apenas urbanizado y era un cambio radical respecto de la ubicación de la Casa Central, situada en plena calle Alameda.

La casona de Lo Contador fue declarada monumento nacional en el año 1974. En los años sucesivos, se han realizado nuevas construcciones que han complementado de forma armoniosa la edificación inicial. Destacan los espacios desarrollados por los arquitectos Alfredo Jünemann y Renato Parada, el Centro de Postgrado diseñado por Sandra Iturriaga y Wren Strabucchi, y el moderno edificio de Estudios Urbanos a cargo de Sebastián Irarrázaval.

OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN A LA MANO

El programa de Investigación en Pregrado tiene como objetivo incentivar la investigación en los alumnos desde sus primeros años de formación. Muchos profesores de la Escuela participan en él para apoyar a los estudiantes y llevar a cabo proyectos conjuntos.



Revista Journal I3. Archivo Journal I3.

Siempre hay una primera vez. La falta de experiencia en investigar no es un obstáculo para empezar a trabajar en proyectos. De hecho, mientras antes se comience mejor. Los que se atrevan encontrarán la ayuda necesaria por parte de profesionales y profesores de la Escuela de Ingeniería de la UC, porque uno de sus objetivos académicos es formar ingenieros que generen valor, nuevos conocimientos y que cuenten con la capacidad de innovar y emprender. De este modo, se pueden transferir a la sociedad soluciones a las distintas problemáticas que se presentan cada día en los más diversos ámbitos.

En este sentido, la Escuela de Ingeniería ofrece numerosas oportunidades, poniendo a disposición una plataforma web que muestra las distintas opciones a elegir, lo cual facilita tanto a los alumnos como a los profesores el proceso de encontrar un tema común y el espacio para colaborar en él. La plataforma conecta a más de 25 centros y departamentos de la Escuela. Incluso hay proyectos en el verano, que se pueden conocer a través de la página de concursos de la Vicerrectoría de Investigación de la UC.

De gran importancia es también la revista *Journal I3: Investigación, Interdisciplina, Innovación*, en la que se dan a conocer algunos de los estudios desarrollados por los alumnos en conjunto con docentes. Los estudiantes en este proceso adquieren las habilidades para redactar un artículo de carácter científico, destreza fundamental para dar a conocer los resultados y conclusiones posteriores a una investigación científica.

En estos proyectos, el alumno establece sus propios límites y el alcance que tendrá la investigación. Incluso esta puede llegar a convertirse en una tesis de magíster, como fue el caso del alumno Franco Zunino, quien exploró sobre la modelación micromecánica de fenómenos de agrietamiento térmico en hormigón y el uso de microscopio de fluorescencia para estudiarlos.

Se trata de otra vía para aprender que puede llegar a ser más amplia y libre que la que entrega una cátedra, puesto que en este tipo de actividad no hay pruebas, pero sí superación constante, y el tema a abordar es elegido de acuerdo a los intereses del estudiante.

Para más información visitar www.ing.puc.cl/ipre.

Selecciones de Ícaro



▶ ¿NECESITAS UNA MANO?

A ROBOT ON THE SHOULDER,
MIT

Porque en más de una ocasión dos manos se nos han hecho insuficientes, un equipo de investigadores del MIT propone "A robot on the shoulder", un par de brazos extras que permiten cargar objetos pesados o maniobrar aun con las manos ocupadas.



▼ UNA DIETA (MUY) CONTROLADA

SCIÖ

Porque estimar cuántas calorías aporta un *snack* ya no es suficiente, la startup Consumer Physics trae SciÖ, un espectroscopio de bolsillo que, conectado a una aplicación de *smartphone* permite examinar la composición molecular de tu comida. ¿Demasiado?



▼ NUBES DE INTERIOR

ARTE Y CIENCIA

Tal como parece, un perfecto pedazo de cielo en una habitación. El artista Berndnaut Smilde, fijando con prolijidad increíble la temperatura y la humedad, puede recrear estas maravillosas nubes de interior solo con una máquina de humo.

▶ ¿EVITANDO DISTRACCIONES?

THE ISOLATOR, HUGO
GERNSBACK (1925)

Porque la desconcentración siempre acecha, y para evitar hasta la más mínima distracción a la hora de estudiar o trabajar, este curioso casco aislador promete eliminar completamente los ruidos exteriores.





Investigación en pregrado: nuevo conocimiento y formación de redes

La Pontificia Universidad Católica de Chile, a través de la Vicerrectoría de Investigación (VRI), entrega a los alumnos distintas oportunidades de indagar y colaborar con académicos en diversas áreas.

Por Tamina Hepner

En la universidad, la investigación resulta fundamental como componente de la formación académica de los estudiantes. Con el objetivo de incentivar a los alumnos a participar en proyectos, la Vicerrectoría de Investigación (VRI) creó el Concurso de Investigación en Pregrado, que ha realizado ya cuatro convocatorias desde 2013. Este concurso nació a raíz de una propuesta de la Consejería Superior de la Federación de Estudiantes de la UC (FEUC), como respuesta al poco conocimiento y visibilidad que tienen los proyectos de los académicos.

El objetivo es aumentar las posibilidades de desarrollo de esta área en el pregrado, con una visión más amplia del campo de acción. Esto incluye que el alumno pueda indagar en otras áreas de conocimiento, no necesariamente de su disciplina.

CÓMO FUNCIONA

La VRI recoge la información de cuáles son las líneas de trabajo que están desarrollando sus académicos y les pregunta si tendrían interés en contar con la colaboración de estudiantes en el proceso.

“Afortunadamente la disposición de los académicos ha sido sorprendente. Incluso aquellos que desconocen el concurso y que se han enterado por otras vías de esta instancia, han pedido ser parte de los proyectos abiertos a recibir ayuda de estudiantes y así hacerlos crecer en su formación y habilidad investigativa”, explica Juan Larraín, vicerrector de Investigación UC en el primer periodo del rector Ignacio Sánchez.

“Hay un claro interés por parte de los académicos en tener mayor visibilidad, que los alumnos conozcan qué estudios están desarrollando. Además, hay oportunidades de sumergirse en otras áreas, con distintos profesores”, señala Jani Brouwer, directora del Colegio de Programas Doctorales de la VRI.

Una vez recopilada la información, la vicerrectoría publica una lista de líneas de investigación vigentes de los docentes interesados en colaborar, y los estudiantes de todas las unidades académicas pueden postular a estas, rellenando un formulario e indicando la línea y el académico con que trabajará. Una vez que ambas partes han acordado el trabajo en conjunto, serán cuatro semanas de inmersión en investigación que no afectarán la carga académica del alumno, ya que la actividad se realiza en período de vacaciones de invierno o verano.

Pueden postular alumnos de todos los años; sin embargo, la labor no debe ser parte de trabajos de tesis o equivalentes.

LA FILOSOFÍA DE LA INVESTIGACIÓN

“Creo que lo que está detrás de este concurso es la idea de que la investigación no necesariamente responde a los mejores resultados académicos de los postulantes, sino que a las intenciones e iniciativas por indagar y aplicar el conocimiento. En definitiva, desarrollar ciencia y aplicarla”, indica Larraín.

Esta voluntad e inquietud por investigar por lo general busca dar respuesta a un deseo por sumergirse en otras disciplinas. Por ejemplo, los alumnos de ingeniería pueden colaborar en ciencias políticas, salud u otras áreas. “Eso es lo interesante de este programa. Se va generando conocimiento multidisciplinario y a la vez se van creando redes de contacto con profesores, estudiantes de magíster, doctorado, entre otros”, destaca Jani Brouwer, y añade: “De esta manera van conociendo la metodología detrás de una investigación. El único ‘trámite’ que se les pide es que rellenen el formulario de postulación y que, pasadas las cuatro semanas del proyecto, entreguen un informe firmado por el profesor. Así de simple”.

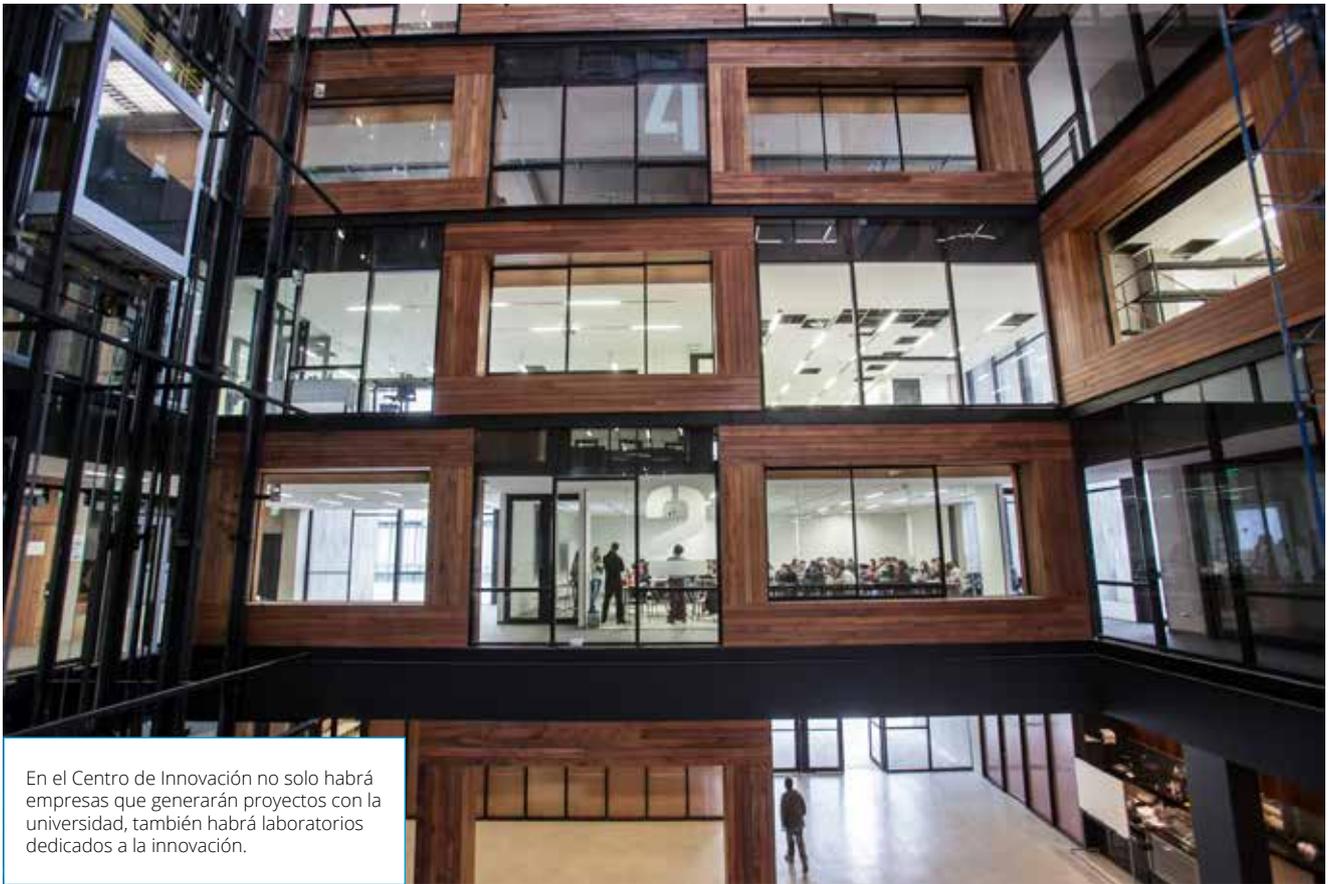
“Esta oportunidad no debiese desperdiciarla ningún alumno de la UC”, indica Juan Larraín, ex Vicerrector de Investigación UC.

OPORTUNIDAD

Este concurso de la universidad es una iniciativa muy aliada al tipo de ingeniero que la Escuela de Ingeniería UC está tratando de impulsar. Un profesional capaz de desenvolverse en diferentes disciplinas, poniendo a disposición sus habilidades y conocimientos para lograr mejorar en algún aspecto un producto, una teoría o la calidad de vida de las personas.

“Esta oportunidad no debiese desperdiciarla ningún alumno de la UC”, indica Juan Larraín.

Si estás interesado en darle una oportunidad al investigador que llevas dentro, postula al concurso para sus convocatorias de invierno y verano, visitando la página de la VRI (www.investigacion.uc.cl, sección Fondos concursables/Concursos VRI).



Alfonso Gómez: “Los alumnos serán los grandes protagonistas del Centro de Innovación UC”

Participación en proyectos de empresas, *fab labs* y clases son solo algunas de las iniciativas de las que podrán ser parte los alumnos de la universidad en el Centro de Innovación UC.

Por Marta Apablaza

A menos de un año desde su inauguración, el Centro de Innovación Anacleto Angelini de la Pontificia Universidad Católica de Chile ya reúne distintas iniciativas relacionadas con la innovación y el emprendimiento, y se prepara para un agitado 2015. En palabras de su presidente ejecutivo, Alfonso Gómez, el centro toma nuevos aires con la inclusión de los estudiantes en los proyectos como uno de los principales objetivos.

“Hace poco tiempo atrás estábamos explicándole a la comunidad de la universidad cuál era el sentido de un centro de innovación”, recuerda Gómez, y confiesa la alegría que significa para él y su equipo la puesta en marcha de este proyecto. “Estamos muy contentos porque hay un nivel de actividad importante y creciente en el centro. Tenemos iniciativas tangibles aun cuando estamos en una fase de despegue”, señala.

LAS PROYECCIONES PARA 2015

“El 2015 será un año que tendrá un énfasis y metas particulares. Tenemos decidido darle importancia a los alumnos en el centro”, señala Gómez, quien sostiene que la misión y arranque del Centro de Innovación han sido muy parecidos a los del Proyecto Crisol, que se implementó en 1985 en la universidad.

“La gran novedad del Proyecto Crisol en aquella época fue decirle a la comunidad que la computación no era solo para los ingenieros, sino que en un futuro cercano sería utilizada por todo tipo de personas. El centro de innovación, de alguna manera, es un símil. Nuestra noticia para la comunidad es que la innovación es para todas las personas, no solamente para el ingeniero o el científico de los laboratorios”, sostiene el docente.

“Al igual que en la experiencia de Crisol, donde los alumnos fueron los primeros que empezaron a usar los computadores, deben ser ellos los grandes protagonistas de las metas que nos hemos propuesto en innovación y emprendimiento. Haremos todo nuestro esfuerzo para atraerlos, incentivarlos, motivarlos”, agrega.



“Tenemos decidido darle importancia a los alumnos en el centro”, explica Alfonso Gómez, presidente ejecutivo del Centro de Innovación Anacleto Angelini UC.

LAS OPORTUNIDADES DE PARTICIPACIÓN

El Centro de Innovación Anacleto Angelini cuenta con espacios donde los alumnos participan activamente. Un ejemplo de esto es el cuarto y quinto piso del edificio, donde una treintena de *start-ups* ya están trabajando, y desde 2015 se incorporarán a este espacio Incuba UC y Emprende UC. Asimismo, Gómez asegura que los estudiantes podrán conocer y trabajar con las empresas que estarán operando en el centro.

“Una de las palabras que nos motiva para el año 2015 es inclusión. Para nosotros, la inclusión desde el Centro de Innovación UC tiene que ver fundamentalmente con sumar a todos los estamentos de la universidad, además de la inclusión disciplinaria”, afirma. El centro trabajará en distintos frentes, tales como la academia, relaciones con empresas y convenios de desempeño.

“Sabemos la importancia que tiene la ingeniería y la ciencia básica en el desarrollo de innovaciones, pero también creemos que la incorporación de diseño, tecnología y educación es importante y bienvenida”, declara este ingeniero civil de la UC.

NOVEDOSOS LABORATORIOS

En el Centro de Innovación no solo habrá empresas que generarán proyectos con la universidad, también habrá laboratorios dedicados a la innovación. Según

“El Centro trabajará en distintos frentes, tales como la academia, relaciones con empresas y convenios de desempeño”.

Alfonso Gómez, existirán tres recintos en los cuales los estudiantes podrán participar: “Estamos hablando de espacios donde vamos a poder desarrollar fundamentalmente prototipos. Habrá un *fab lab* que será parte de una red mundial y que tendrá impresoras 3D, cortadoras láser y brazos robóticos, como parte de las herramientas que se podrán utilizar. Así, también habrá un segundo laboratorio especializado en biología sintética. Finalmente existirá un tercer laboratorio que estará relacionado con el desarrollo de chips electrónicos y con el mundo digital, completando un panorama que tendrá mucha importancia y con toda seguridad será un polo de atracción”.

“El 2015 no nos quedaremos esperando que los alumnos vengan. Por el contrario, promoveremos y convocaremos estudiantes de pregrado, postgrado y de doctorado. El centro es fundamentalmente un lugar de encuentro. Quisiéramos que los alumnos sean los grandes protagonistas del Centro de Innovación UC”, concluye el profesor.



Entrevista a Julio Fuentes:

“Un Ph.D. debe tener la capacidad de analizar e identificar problemas específicos de la industria”

Julio Fuentes es jefe de asistencia técnica y de desarrollo en una empresa multinacional. Obtuvo su doctorado en Alemania, lugar donde para que un profesional pueda convertirse en académico, además del doctorado, es condición necesaria haber trabajado en alguna empresa. En ese país, cuenta, existe una relación mucho más profunda entre academia e industria.

Por David Fuller

Julio Fuentes es jefe de asistencia técnica y de desarrollo en ThyssenKrupp, empresa multinacional de 150 mil colaboradores, con operaciones en Chile. Hizo sus estudios de ingeniería de ejecución mecánica en la Universidad de Talca, obteniendo su título el año 2004. Tras irse a Alemania, se graduó de ingeniero civil, allí llamado el *Diplom Ingenieur*, y finalmente durante 2011 alcanzó el grado de doctor, ambos en la Technische Universität Dresden.

La entrevista se llevó a cabo un día viernes a las cinco de la tarde. Tras una serie de vueltas, idas y venidas, logré llegar a las maestranzas de la empresa, ubicadas en la comuna de Cerrillos. Tras esperarlo sentado en la recepción durante unos diez minutos, finalmente apareció por la puerta, vestido en tenida semiformal, con botas y casco de seguridad. Claramente venía de supervisar algún proyecto dentro de la planta. Tras saludarnos, presentarnos, caminar a su oficina, y una breve conversación previa, comenzamos la entrevista.

—Primero lo primero. ¿Cómo ocurrió todo, cómo lo hizo usted para irse a estudiar a Alemania?

“Bueno, por convenios de mi universidad acá en Chile, dentro de mis estudios de pregrado tuve la posibilidad de irme a Alemania de intercambio, como becario del ‘servicio de intercambio alemán’. Al terminar ese periodo, volví por un semestre y por esas cosas de la vida se me dio la posibilidad de regresar a Alemania para hacer mi tesis de grado.

En ese tiempo, mientras estaba allá, paralelamente estuve trabajando en un proyecto relacionado a la soldadura y recargues duros específicos para el área de minería. Y en ese periodo tuve la opción, en la misma universidad, de hacer un doctorado. Entonces, yo me quedé en Dresden, con financiamiento alemán. No tuve una beca chilena ni nada así, sino que ellos me dijeron: ‘¿Sabes qué? ¿Quieres trabajar con nosotros? Puedes hacer tu doctorado y te lo financiamos’.

Ahí el problema era que yo solamente tenía el título de ingeniero de ejecución mecánico, y para poder acceder al título de ingeniero, o de doctor ingeniero, tenía que tener un máster o la ingeniería civil. Por lo mismo, hice cursos en paralelo cuando estaba realizando el doctorado, para obtener el *Diplom Ingenieur*, como le llaman en Alemania”.

—¿Cómo fue el tema del idioma? ¿Usted sabía alemán desde antes?

“No, yo no sabía alemán, y el primer año que estuve allá tuve que estudiarlo, pero no lo hice muy a fondo. Me costó bastante. El idioma lo aprendí de manera más fuerte cuando estaba haciendo el doctorado. Digamos, lo fortalecí, porque un idioma nunca se termina de aprender.

Pero creo que es un tema normal, porque primero absorbes mucha información, aprendes todo lo que ocupas en el día a día, y después vas aprendiendo el lenguaje más técnico, o asociado a temas especiales”.

—Una vez de vuelta en Chile, con el Ph.D. y los otros títulos en la mano, con un perfil indiscutiblemente académico, ¿no pensó en dedicarse a la academia, o en seguir estudiando?

“La academia no es algo que tenga olvidado. Sin embargo, lo que me gustaría hacer antes de pasar a la academia directamente es tomar el camino que se sigue en Alemania. Allá, para ser un profesor de ingeniería, necesariamente tienes que haber estado en la industria. Si no, no eres profesor, no puedes ser profesor. ¿Cuál es el recorrido natural de un profesor en Alemania? Bueno, primero hacer toda la parte académica, ingeniería y doctorado, y luego irse a la industria. Trabajar en alguna empresa, unos cinco, seis o siete años, por ejemplo, llegar a ser gerente de desarrollo, y de ahí saltar a la universidad. Ese es el recorrido de un profesor en Alemania”

“La idea es que tú tengas la capacidad de analizar e identificar problemas específicos de la industria. Reconocer un problema, generar toda la base para poder atacar ese desafío y solucionarlo”.

—Interesante, porque acá en Chile una crítica que se le hace mucho a la academia es que es muy teórica, y que le falta contacto con la realidad de la industria.

“Claro. Yo creo que el modelo alemán tiene muchas ventajas, porque es un sistema de sinergia entre la industria y la universidad. Entonces, cuando tú has estado en la empresa, y has aprendido cuáles son las falencias, cómo se trabaja en ella y sus diferencias respecto de la academia, puedes entender mejor cuando estás al otro lado de la moneda, en la universidad. Puedes orientar mejor tus esfuerzos y tus objetivos para brindar un mejor servicio.

Eso explica por qué en Alemania existe esa estructura, y de verdad tiene un sentido súper fuerte. ¿Qué es lo que pasa? Un *Doktor-Ingenieur* se va a trabajar a una compañía, genera sus redes de contactos en ella, aprende a conocer el medio, sabe cómo funciona el negocio. Se cambia a otra compañía, se inserta en ese medio, obtiene más contactos, amplía su visión de cómo es el desarrollo tangible y de cuáles cosas se necesitan en la empresa. .

Después vuelve a la universidad, y en ese punto tiene los contactos, domina cómo se trabaja, cuáles son las falencias y las necesidades. Pero, adicionalmente, en la uni-

versidad tiene los medios de laboratorios, de gente joven que tiene ideas, los recursos que pueden obtener con fondos concursables, etcétera, y eso un doctor lo ocupa para generar valor agregado, que va a ir netamente al desarrollo del estado del arte”.

—**Y se vuelve a inyectar, es un círculo virtuoso.**

“Se vuelve a inyectar a la industria. Ese es el círculo. Ese es el círculo que Chile tiene que generar en algún momento. Ese ciclo es el que Chile tiene que potenciar, incentivando a los doctores a dar el paso que di yo, de decir ‘yo no me voy a la universidad’”.

—**¿Allá en Alemania en general todos los *Doktor-Ingenieur* vuelven a la universidad como profesores?**

“No necesariamente. Tú encuentras mucha gente que tiene doctorados que se quedan trabajando en la industria. Es muy común, muy común. Entonces, naturalmente surge la pregunta: ¿Cuál es la ventaja de tener un doctorado? ¿Es simplemente poder decir ‘tengo a mi nombre un cartón de *Doktor-Ingenieur*’? La verdad es que yo creo que existen diferencias, pero no necesariamente una persona que tenga un doctorado va a saber más que otra en un área determinada”.

“Yo creo que en Chile todavía está un poco inmadura la inserción de doctores en industrias. Creo que debería ser de esa manera, porque de otro modo Chile no va a dar el salto que necesita dar”.

—**Tal vez me equivoco, pero yo creo que en general un Ph.D. sí va a saber más que un titulado que no es doctor. Sin embargo, creo también que “la cantidad de conocimiento” no es el foco ni la esencia del proceso, ¿o sí?**

“No es la esencia. Por lo menos, no es la esencia de los programas en el sistema de formación de doctores en Alemania. La idea es que tú tengas la capacidad de analizar e identificar problemas específicos de la industria. Reconocer un problema, generar toda la base para poder atacar ese desafío y solucionarlo. Cuando cursas el doctorado, desarrollas más bien la parte analítica, por sobre simplemente aumentar tu ‘cantidad de conocimiento’.

Por ejemplo, logras generar propuestas de mejoras, aprendes cómo trabajar con literatura, hacer análisis de patentes existentes. Aprendes cómo administrar recursos

para poder llegar a un objetivo, a un resultado de proyecto, digamos, a materializar un desarrollo. Asimismo, aprendes a identificar problemas no aparentes.

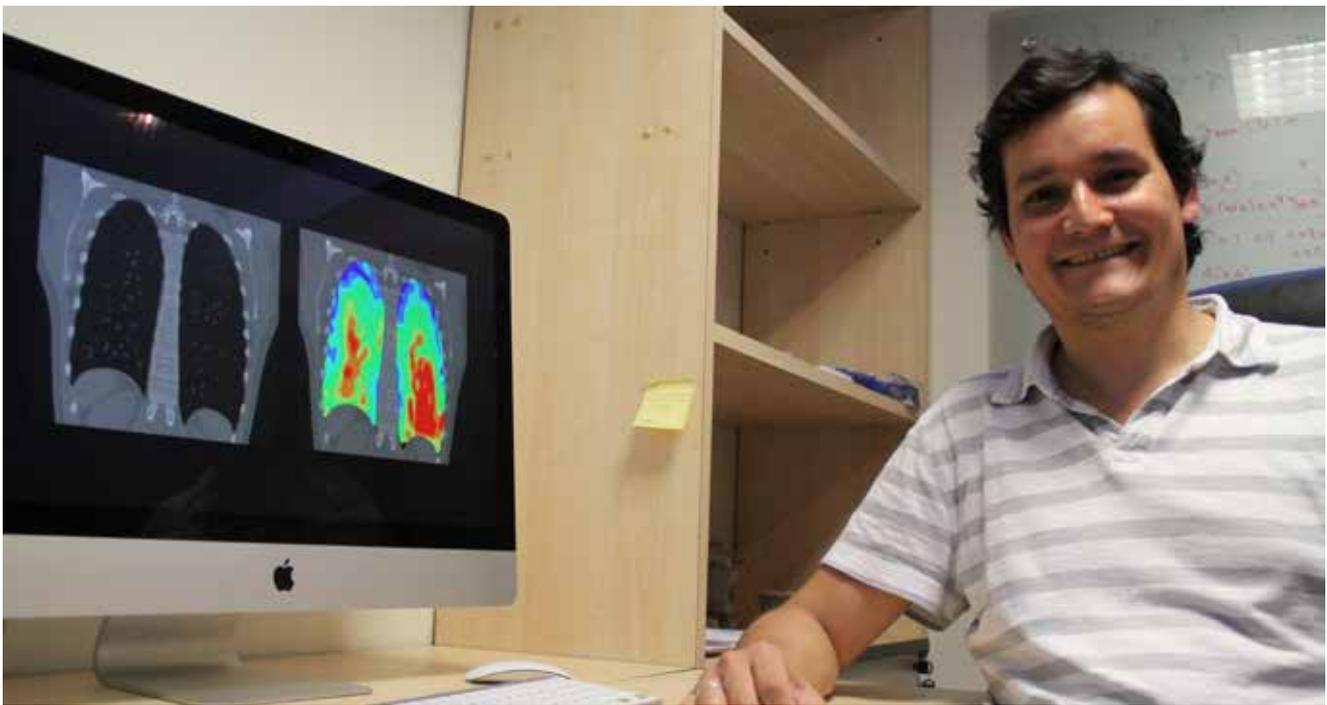
Y esto último incluso es el foco de todo el programa de doctorado en Alemania.

Mi profesor siempre me decía ‘¿qué es lo que tiene que hacer?’. Usted tiene que identificar las falencias’. Entonces, al principio uno obviamente empieza a dar palos de ciego, te dices cosas cómo ‘oye, me gustaría saber esto’, pero te das cuenta de que no tiene sentido, porque haces un análisis de literatura y eso ya lo hicieron los rusos hace veinte años, o los japoneses hace cincuenta. Haces un análisis de patentes y te das cuenta de que existen cosas similares y que dedicarse a ello ya no tiene relevancia. Pero te dejan solo, para que tú le des vueltas y tú encuentres el problema. Una vez que lo detectaste y dices ‘eso es lo que quiero hacer’, tienes que buscar la manera de solucionarlo”.

—**¿Usted recomendaría hacer un doctorado?**

“Sí, lo recomendaría. Y además diría que es necesario. Yo creo que en Chile todavía está un poco inmadura la inserción de doctores en industrias. Creo que debería ser de esa manera, porque de otro modo Chile no va a dar el salto que necesita dar.

Si tú analizas ahora la economía chilena, está netamente sostenida en la venta de *commodities* en la industria minera, en vender el material. Pero tenemos que dar el salto y agregar valor, hacer productos, desarrollar las ventajas comparativas como país. Si no, cuando se acabe el mineral de cobre, nos vamos todos para la casa. Entonces, es necesario”.



Ingeniería biomédica: hacia una medicina más eficaz y personalizada

Las simulaciones del comportamiento del cuerpo humano realizadas a través de modelos matemáticos se configuran como una nueva área de la ingeniería, que en nuestra Escuela es impulsada por el profesor Daniel Hurtado.

Por Ignacio Madrid

Daniel Hurtado, profesor del departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Escuela de Ingeniería, es uno de los fundadores de la iniciativa de ingeniería biomédica. Define su trabajo como "una intersección entre las matemáticas aplicadas y la modelación computacional. Mucha teoría, pero también muchas aplicaciones y simulaciones con biología y medicina". Su objetivo es diseñar modelos que sean matemáticamente rigurosos y que sirvan tanto para personalizar cirugías cardíacas como para diseñar nuevos dispositivos.

—¿Cómo es ser protagonista de este diálogo interdisciplinario?

“Al comienzo no es fácil, porque hay que romper mucha inercia y muchos paradigmas, sobre todo aquí en Chile. A pesar de eso, ahora estoy muy contento, porque veo cómo los médicos están empezando a valorar y de alguna manera querer bailar este mismo baile con los ingenieros. Se han dado cuenta que estamos entregando resultados que son muy potentes, prometedores. Ahora, no es decir simplemente “voy a trabajar con los médicos, díganme qué ecuación les resuelvo o qué teoría necesitan que desarrolle”. Muy por el contrario, uno tiene que aprender

el lenguaje de los médicos y biólogos. De hecho, yo tuve que estudiar biología, fisiología, tuve que pedir que me explicaran. Y ellos por su cuenta, me lo pedían a mí. Tiene que haber esa disposición a conversar con otra área.

—¿Cómo ha resultado esta conversación con los médicos?

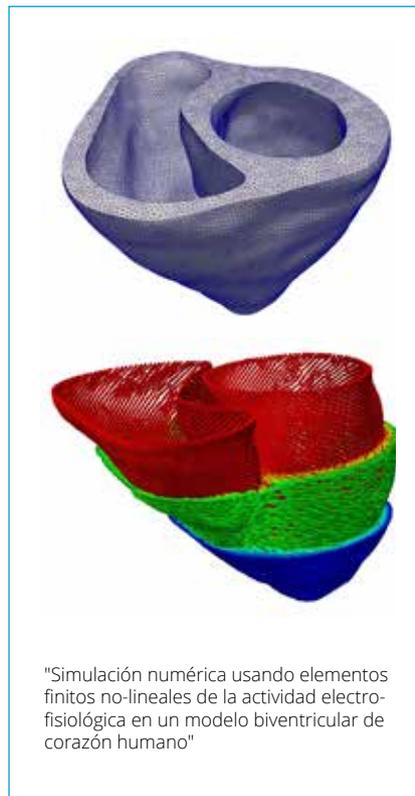
“Algunos se han sorprendido de que las matemáticas puedan aportar tanto en el campo de la medicina. Otros toman esto con un poco más de cautela, porque hay que pensar que la medicina trabaja con seres humanos, entonces cualquier riesgo significa poner en peligro una vida. Eso sí, la mayoría de los médicos están abiertos; no creo que lo tomen como algo que los vaya a reemplazar, jamás. Es como pensar que el computador va a reemplazar al ingeniero. Antes, era el ingeniero quien hacía los cálculos, hoy eso lo hace el computador, pero el ingeniero no fue reemplazado; muy por el contrario, se potenció. Este ejemplo es análogo para la medicina.

—¿Y con la matemática?

“Desde el punto de vista matemático hay un doble propósito. Por un lado, los problemas en biología son tan complejos que perfectamente pueden ser la nueva física de las matemáticas. La matemática se ha inspirado mucho en la física: por ejemplo todas las ecuaciones de electromagnetismo influyeron en la teoría de ecuaciones diferenciales parciales. Yo tiendo a pensar que la biología y la fisiología justamente van a ser esta nueva fuente de muchos problemas abiertos en matemática. Y al otro lado también, obviamente la biología se va a beneficiar de lo que la matemática, que es un lenguaje muy poderoso, pueda aportarle y podrá además llevar adelante nuevos estudios.

—¿Y cómo se aplica todo esto para entender el funcionamiento del corazón?

“Con el profesor Duvan Henao de la Facultad de Matemáticas pudimos reformular la ecuación de electrofisiología del corazón, en lo que se conoce como un problema variacional, y al hacer eso, hay muchos resultados que vienen del cálculo de variaciones que se pueden aplicar. Y así, en un trabajo muy bonito que ya está publicado, desarrollamos toda esa teoría y dedujimos para un modelo muy simple



"Simulación numérica usando elementos finitos no-lineales de la actividad electrofisiológica en un modelo biventricular de corazón humano"

condiciones sobre parámetros que garantizaban existencia y unicidad de soluciones, convexidad, etc. Del mismo modo, los diseños permiten asegurar convergencia al hacer simulaciones numéricas para resolver, que es algo que se puede asegurar en muy pocos problemas de ingeniería. Así que es algo bien potente.

—¿Qué resultados espera de este desarrollo teórico?

“Quizás uno de los resultados esperables, al menos desde mi punto de vista, es que se usen estos modelos en situaciones de emergencia, por ejemplo, en simular rápidamente el corazón de un paciente para determinar una cirugía, si este ya tuvo un infarto. Uno no puede esperar dos días la simulación, ni estar probando parámetros en ese lapso, esperando que coincidan. Nuestra teoría apunta a selección de modelos donde la convergencia está garantizada: van a correr a la primera vez y van a converger. El impacto es fortísimo.

—¿Y siente que la medicina marcha hacia el uso de estas herramientas?

“Yo creo que sí. El uso de simulaciones matemáticas va muy en la línea de la medicina personalizada. Y hoy en día todo

el mundo habla de medicina personalizada. Si queremos hacer un fármaco, por ejemplo, para eso necesitamos el genoma del paciente, y según eso diseñamos el remedio. Nosotros en simulación podemos hacer algo parecido: deseamos analizar un corazón y no es un corazón genérico. A partir de imágenes que son exclusivas de un paciente, generamos un corazón tridimensional y resolvemos un problema determinado con parámetros que pueden venir de un electrocardiograma. No me cabe duda que estos métodos se van a aplicar. Es lo mismo que pasa hoy en ingeniería: cuando se diseña un edificio o un circuito eléctrico, no hay reglas generales, cada uno merece un tiempo y un diseño exclusivo. La medicina claramente no será la excepción.

LA EXPERIENCIA DE UN ALUMNO

La oportunidad de explorar la interdisciplina ya es un hecho para los alumnos de la Escuela de Ingeniería. Así lo demuestra Sebastián Castro, quien investigó con el profesor Hurtado y nos cuenta su experiencia.

“Mi trabajo con el profesor Daniel me ha mostrado un gran campo de posibilidades. Considerando los conocimientos base que me entregó el departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, y el darme cuenta que puedo aplicar los mismos conceptos en otras áreas me motivó mucho a trabajar en los proyectos de ingeniería biomédica. Y es que, pese a que tuve que estudiar fisiología cardíaca para entender físicamente los modelos, los problemas se reducen a un modelamiento matemático idéntico a los sistemas estructurales. Mi labor principal ha sido permitir recuperar una respuesta más realista de lo que sucede en el corazón, como la generación de mallas tridimensionales de la estructura cardíaca y la optimización de tiempos de ejecución de códigos de horas a minutos, entre otros. Ha sido una muy grata experiencia”.



Los estudiantes Carlos Ávila y Javier Rivera durante el proceso de planificación de las simulaciones a realizar con el modelo.

Estrechar lazos con los futuros colegas a través de la investigación

Carlos Ávila, alumno de 5° año de *College* en Ciencias Naturales y Matemáticas, y Javier Rivera, alumno de 5° año de Ingeniería, cuentan cómo participar del programa de Investigación en Pregrado les ha permitido crecer en aspectos que nunca imaginaron.

Por Cristina Contreras

El profesor Carlos Bonilla, del departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, trabajó junto a un grupo de alumnos de pregrado y postgrado en un estudio que busca generar un modelo de erosión y transporte de contaminantes para la zona central de Chile. El proyecto mezcla modelación con trabajo en terreno, y en ella han participado ocho estudiantes de pregrado, entre los cuales se encuentran Carlos Ávila, de 5° año de *College* en ciencias naturales y matemáticas, major en “Fundamentos de la ingeniería” y doble minor en “Fundamentos de ingeniería ambiental e innovación”; y Javier Rivera, de 5° año de ingeniería civil de industrias, diploma en ingeniería ambiental. Los dos jóvenes participaron en las fases de modelación y revisión bibliográfica del proyecto.

En primer lugar, los integrantes del equipo se familiarizaron con el modelo WEPP, el cual utilizaron para modelar distintas combinaciones de clima y suelo de la Zona Central. Luego analizaron los datos obtenidos y, a partir de ellos, buscaron relaciones entre distintas variables. El trabajo individual fue complementado con reuniones semanales, en las cuales cada miembro del equipo, ya fuera de pregrado, magister o doctorado, presentaba sus avances y recibía *feedback* del resto de sus compañeros. “Es un ambiente de crítica y discusión sana. Cada reunión fue un aprendizaje, desde algunos temas muy simples hasta otros muy complejos en este nuevo mundo en el que me sumergía: la investigación”, cuenta Javier. “Es una gran oportunidad la que entrega la Escuela”, agrega Carlos, y afirma

que el haber podido investigar en pregrado ha sido una de las experiencias más beneficiosas que ha vivido en la universidad.

Uno de los aspectos positivos, coinciden Carlos y Javier, es la posibilidad de interactuar con estudiantes de postgrado y formar parte de estudios que muchas veces se enmarcan en proyectos más grandes, a nivel de departamento, los que no hubieran podido conocer de otra manera. Ambos asistieron a las sesiones de preparación de defensas, seminarios y congresos, con lo cual se familiarizaron con los detalles que pueden transformar por completo una presentación.

“Son oportunidades únicas, que potencian lo aprendido en los cursos de la malla de ingeniería y también te permiten estrechar lazos con quienes en el futuro serán tus colegas”, afirma Carlos. Esta visión se suma a la de Javier, quien opina que este tipo de instancias, además de permitir aprender a organizar el tiempo, son muy enriquecedoras, especialmente por el compromiso y la motivación que entrega el profesor semana a semana.

Entre las obligaciones que implicó el curso estuvo realizar un informe de avance a la mitad de semestre en formato *paper* de investigación, en el que se evaluaron los aspectos formales de escritura y también los contenidos de la investigación de cada uno. Al final del período, además, se entregó un informe completo y se expuso el trabajo al equipo. Sin duda, se trata de “un aporte a nuestro acervo intelectual y que también ayuda a mejorar nuestras habilidades blandas, necesarias en el desarrollo profesional y personal”, opina Carlos.



Los creadores presentan su invención (de izquierda a derecha). Vincent Pollock, Diego Merino y Fabrizio Arnalot. También participó pero no aparece en la foto José García.

Proyectos de alumnos solucionan problemáticas reales en alianza con instituciones sociales y empresas B

La Subdirección de Emprendimiento Social contactó a fundaciones, ONG, empresas B (con rol social y medioambiental) y municipalidades para ofrecer el trabajo de alumnos de Ingeniería UC en la solución de algunos de sus desafíos. Un triciclo para personas con discapacidad y una bicicleta que transforma energía cinética en energía eléctrica fueron los primeros resultados.

Por Soledad Ferrer
Subdirectora de Emprendimiento Social, Ingeniería UC

Un nuevo espacio para impulsar la conciencia social, la creatividad y la innovación de los alumnos es lo que busca la Subdirección de Emprendimiento Social de la Escuela de Ingeniería UC. Queremos motivar a los alumnos a empatizar con las problemáticas sociales y a buscar soluciones desde la investigación y la academia.

En 2014 las dos primeras instituciones en participar de esta iniciativa fueron la empresa B Emprediem y la Fundación Teletón. Con Emprediem el proyecto se llevó a cabo a través del programa Balloon Chile, que apoya el desarrollo de emprendimientos locales en comunidades de escasos recursos, culminando con la invención de una bicicleta que transforma energía cinética en energía eléctrica. En tanto, con Fundación Teletón se implementó un triciclo para personas con discapacidad en sus extremidades inferiores. Tanto el apoyo de las instituciones como de los profesores de la Escuela de Ingeniería fue fundamental.

El profesor Ángel Abusleme, del departamento de Ingeniería Eléctrica, formó el equipo y guió el trabajo del primer grupo para crear un dispositivo que permitiera transformar la energía cinética que se genera al pedalear. El proyecto surgió a raíz del diagnóstico de Emprediem, que observó la importancia del uso de la bicicleta en sectores de escasos recursos y la posibilidad de aprovecharlo para generar energía. El equipo, conformado por alumnos de la especialidad eléctrica y mecánica, revisó la bibliografía existente, levantó información por medio de encuestas y concibió diversos prototipos para testar su funcionalidad. En el momento de la realización de este artículo se estaba finalizando la versión beta del prototipo final.

En el segundo caso, el profesor Diego Celentano, del departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, y sus alumnos del curso “Diseño de elementos de máquinas”, desarrollaron dos triciclos con un innovador sistema de conducción diseñado especialmente para personas con discapacidad o parálisis en las extremidades inferiores. El proyecto fue parte



Otro modelo y sus creadores (de izquierda a derecha). Osvaldo Schwencke, Matías Sabelle, Sebastián González y Flavio Gutiérrez.

del concurso Innovatón, convocado por la Fundación Teletón y dirigido a estudiantes de pregrado de educación superior, con el objetivo de generar nuevas soluciones inclusivas para mejorar la vida cotidiana de personas con discapacidad. El proceso incluyó charlas de profesionales de la Teletón y encuentros con sus pacientes. Los prototipos creados no solo respondían a requerimientos de funcionalidad, sino que también involucraban aspectos de seguridad y confort.

Fue una gran experiencia conocer los sueños de estos niños de querer andar en bicicleta o en triciclo, e intentar cumplirlos gracias al producto que estaban creando nuestros alumnos. La labor requirió de mucho esfuerzo por parte de los estudiantes, quienes debieron empatizar con las necesidades de los usuarios.

Durante el 2015, se levantarán nuevos proyectos sociales en conjunto con otras instituciones a partir del trabajo investigativo de los alumnos. La Subdirección de Emprendimiento Social quiere ofrecer una verdadera ayuda a las instituciones sociales para que resuelvan sus problemáticas de manera más eficaz. Aspiramos a que desde la ingeniería se enfrenten los desafíos que presenta el país, integrándolos a la vida académica y personal con soluciones sociales reales.

Para más información se puede escribir a es@ing.puc.cl

“La Subdirección de Emprendimiento Social quiere ofrecer una verdadera ayuda a las instituciones sociales para que resuelvan sus problemáticas de manera más eficaz”.



Medición del módulo de elasticidad es una probeta de hormigón reforzada con fibras de carbono.

¿De qué están hechas las cosas?

Siendo alumno de pregrado, Franco Zunino investigó el uso de la ceniza de cascarilla de arroz para la fabricación de un hormigón más sustentable, y el empleo de una planta nativa para construir casas de adobe. Todo a partir de su pasión por la ciencia de materiales.

Por Sebastián Parr

“ El cemento, que es el material ligante en el hormigón, tiene una de las mayores huellas de carbono antropogénicas. Cualquier tecnología que apunte a usar menos cemento por metro cúbico de hormigón, manteniendo el mismo nivel de desempeño mecánico, es un aporte en la línea de la sostenibilidad”, explica Franco Zunino, ingeniero UC titulado en 2014 y que ya suma logros como investigador. Siendo alumno de pregrado obtuvo su primera publicación ISI, una beca Conicyt para una pasantía de investigación en Australia y reconocimientos en distintos congresos.

Zunino explora nuevas oportunidades de investigación, siempre con el objetivo de lograr eficiencia al manejar los recursos.



Zunino cuenta que la oportunidad se la dio en su tercer año de estudio Mauricio López, profesor del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción y actual director de Pregrado de la Escuela, pero encontró su motivación al darse cuenta de que la ingeniería es una carrera que entrega herramientas para comprender el entorno.

Lo que más le apasiona, dice, es la ciencia y tecnología de materiales “pues está en todo lo que nos rodea. Dentro de esta disciplina, mi área de estudio se centra en materiales basados en cemento y hormigón, el insumo de construcción más usado para edificación en Chile. El uso de la ceniza de cascarilla de arroz en el hormigón busca, por un lado, hacerse cargo de un desecho de la industria agrícola y, por otro, conseguir mejoras en ciertas propiedades, como la resistencia a compresión y la permeabilidad”.

Zunino explica que la utilización de residuos de otras industrias en el hormigón no es un problema simple: “Hay muchísimos factores, tales como propiedades mecánicas, durabilidad, fenómenos de agrietamiento y toxicidad, que deben evaluarse antes de comenzar a proponer nuevas líneas de aprovechamiento de residuos. La química ha sido por siempre una ciencia que me ha maravillado, y me apasiona comprender como al reaccionar cierto material con otro, es posible conseguir características útiles para aplicaciones determinadas de la ingeniería civil. La ciencia de materiales nos proporciona el conocimiento necesario para comprender y estudiar esta transformación”.

Durante su estadía en Australia también investigó el uso de *Spinifex*, un género de plantas nativas de ese país que sirve para elaborar casas de adobe reforzado en comunidades remotas donde las distancias hacen inviable llevar hormigón desde las ciudades, ubicadas en la costa, hacia los asentamientos del centro del país. Otro de sus trabajos ha sido la modelación micromecánica

de fenómenos de agrietamiento térmico en hormigón y el empleo de técnicas de microscopía de fluorescencia para estudiarlo.

Actualmente, Zunino explora nuevas oportunidades de investigación, siempre con el objetivo de lograr eficiencia al manejar los recursos, ya que en su opinión es el camino hacia una sociedad verdaderamente sustentable: “Fue la principal motivación para aceptar participar como investigador de un proyecto que pretende generar marcos de análisis de flujo de materiales residuales. Me interesa integrar diversos procesos productivos que puedan posibilitar sinergias, con el fin de lograr el mejor resultado final con el menor impacto para el medio ambiente de la ciudad, lo que se conoce como metabolismo urbano. Existen oportunidades de desarrollo científico-tecnológico local si logramos que interactúen industrias distintas, como la construcción y la agricultura o la generación eléctrica, en pos de conseguir un objetivo común de eficiencia”.



El desafío de emprender siendo estudiante

Al quinto año de estudio en Ingeniería UC, decidí congelar la carrera para dedicarle tiempo completo a mi kit para detectar la marea roja. Me cuestionaron, no me creyeron, pero lo logré y ahora trabajo a toda máquina para hacer crecer mi proyecto.

Por Emilia Díaz

Emprender mientras estudias puede ser la mejor decisión de tu vida. En ningún otro momento vas a tener más energía; pareciera como si pasar tres noches enteras estudiando Estática y Dinámica a punta de Redbull fuera algo que solo se puede hacer a los veintipocos. Es también tu momento con menos responsabilidades, sin hijos a los que cuidar ni familia en general a la que mantener. Y durante esta época de la vida la mayoría disfruta del relajo de vivir con sus padres o, si están lejos, vivir en un departamento financiado por sus padres (un saludo a regiones).

Emprender mientras se estudia también puede ser la peor decisión de tu vida. En un momento en que echarte Cálculo I parece lo peor que podría pasarte, es complicado enfrentarse a problemas reales. Las noches que pasas

sin dormir por culpa de la Facultad de Física no se comparan a las noches que pasas pensando qué vas a hacer si nada funciona. Los nervios de la presentación final de Desafíos de la Ingeniería no se acercan siquiera a las náuseas de tener que ir a pedir plata para que no quiebre tu empresa. Ni hablar de que comience a irte bien y tener que enfrentarse a la decisión de estudiar o emprender, todos van a creer que estás mal de la cabeza por querer congelar Ingeniería en la Católica.

Como alguien que pasó por todo esto (estudiar, emprender y congelar) aún no podría decir a ciencia cierta si mi decisión fue buena o mala. Estando en quinto año de Ingeniería Civil en Biotecnología, congelé la carrera para presentar mi proyecto de emprendimiento a Corfo. Se trataba de un kit para detectar marea roja y evitar con esto la intoxicación por consumo de marisco contaminado.

Me esperaba que los conocidos me trataran de loca y mis profesores me pusieran mala cara, pero no pensé que me iba a pesar tanto. Mis amigos me miraban casi con lástima, y mis abuelos no entendían por qué se me ocurrió hacer tal barbaridad. En la familia cuesta mucho perder al futuro ingeniero. Con la confianza de mi padre y mi pareja intenté ponerle buena cara a todos y dedicarme a trabajar.

Algo que la Escuela definitivamente te aporta para este tipo de cosas es una buena dosis de resiliencia. Después de sacarte un 1,2 en esa prueba para la que estudiaste la semana completa, uno que otro recurso tienes para soportar las malas caras. El echarte un ramo con 3,9 viendo cómo el de al lado pasa con 3,8 de alguna forma te ayuda a mantener la calma cuando el jurado del concurso decide que ese al que no le creíste nada tiene una mejor idea que tú. La verdad es que mis experiencias de primer año: echarme ramos, sacarme unos, sufrirlo todo; me ayudaron a sobrellevar los momentos en que esto del emprendimiento no funcionaba.

Pero nada te prepara para cuando funciona.

Cuando tu proyecto comienza de verdad, las velocidades cambian. Los horarios. Las responsabilidades. Un día estás hablando con un amigo sobre cómo van las cosas con tu *startup* y al día siguiente tienes que explicarle lo mismo, temblando y con formalidad, a un socio de Google. El mismo trabajo que hiciste en algún momento en tus cursos que bordeaban Comercial se lo pediste a una empresa gigante y estás viendo qué parte de tu pieza vendes para pagarles. Quedarte programando un viernes en la tarde como cuando sufrías por entregar la tarea de Programación es lo mínimo aceptable, y de repente llegas al domingo con un café frío y un hambre de tres días pero con la satisfacción de que al fin tienes algo entregable – no para el profesor, no para el ayudante, sino para el inversionista gringo que llega mañana y quiere tu aplicación lista para comprarla. En mi caso, me presenté a Corfo y logré ganar un fondo de 180 millones de pesos. De súbito toda la gente que me miraba con cara extraña comenzó a meterse en mi página web, a verme en las noticias y a preguntarme “Oye, ¿y yo podré emprender también?”.

Los siete de la escuela son lo único que te prepara para la sensación de victoria que te genera saber que lograste lo que nadie creía posible. Aparte de eso, el resto lo harás

“En mi caso, me presenté a Corfo y logré ganar un fondo de 180 millones de pesos. De súbito toda la gente que me miraba con cara extraña comenzó a meterse en mi página web, a verme en las noticias y a preguntarme “Oye, ¿y yo podré emprender también?”.

al azar, a prueba y error, equivocándote más que acertando. Vas a sentirte peor que cuando el promedio estuvo tres puntos completos sobre tu nota en el examen, mejor que cuando tu profesor favorito vio tu potencial y te pidió que fueras su ayudante. Vas a trabajar más duro que en cualquier ramo que tomes y vas a saber menos sobre aquello a lo que te enfrentas que en cualquiera de ellos.

Quizás salgas airoso. Quizás no. En eso, emprender es igual a estudiar en la Escuela. En algunos casos, tus esfuerzos no se condicen en lo más mínimo con el resultado. Quizás gracias a una idea tonta te vas a volver millonario. Quizás vas a cambiar el mundo con algo que descubriste por error. O tal vez entregarás tu vida por un proyecto que adoras pero que nunca saldrá a la luz del día, y volverás con la cola entre las piernas a terminar tus ramos de plan común mientras tu generación se titula.

Y aunque vuelvas con un sabor amargo en la boca y los aplaudas desde lejos, algo te dirá que, aún con título, ninguno de ellos va a estar preparado para la vida, esa real que no tiene exámenes y que aunque los tuviera nadie sabría de dónde estudiar. Porque aún con todos los ramos y las pruebas ninguno tuvo la posibilidad de aprender a vender una idea, de convencer a un público experto de su visión, de dirigir a un equipo enorme sin ninguna coherencia, de aplicar su conocimiento a un problema real y formular una solución que afecte al resto del mundo. Porque ninguno salió preparado para lo que se viene.

Ninguno, salvo tú.



Drones para uso civil: automatización y monitoreo a distancia

Desarrollar ingeniería de punta en vehículos aéreos no tripulados ha sido el objetivo principal de Diego Ávila, ingeniero UC que convirtió un proyecto universitario en su oficio.

Por Tamina Hepner

“ Soy de esa clase de personas a las que les gusta hacer cosas entretenidas. Esto partió siendo un pasatiempo, pero hoy es algo a lo que me dedico como profesión”, dice Diego Ávila, egresado de ingeniería UC.

En cuarto año, en el laboratorio de control automático, comenzó su aventura con los drones, o vehículos aéreos no tripulados, como proyecto de un ramo. Recuerda que con su compañero Hernán Campillo utilizaron teléfonos inteligentes como “cerebros” del cua-

dricóptero. “La programación de celulares era más sencilla y, por lo tanto, menos costosa”, dice.

OPORTUNIDAD DE CRECIMIENTO

Dos años más tarde, finalizando la carrera, otro proyecto lo desafió a crear un estabilizador de cámaras sobre drones. Y desde ese momento todo se convirtió en algo más serio. Junto a Campillo postularon al Fondo Ingeniería de la Escuela de Ingeniería y consiguie-



Los drones llevan instalada una cámara HD que graba a 60 cuadros por segundo, lo que les permite tener capturas en cámara lenta en máxima calidad.

“Soy de esa clase de personas a las que les gusta hacer cosas entretenidas. Esto partió siendo un pasatiempo, pero hoy es algo a lo que me dedico como profesión”, dice Diego Ávila, egresado de ingeniería UC.

ron apoyo para impulsar la idea de la fabricación de drones para monitorear fenómenos a gran escala, como desastres naturales, sobrevolando el lugar y evaluando la situación.

Además de otras postulaciones, la pasión de Diego por los drones le valió una beca de Google para desarrollar sus habilidades computacionales relacionadas a la fabricación de estos equipos. Los fondos fueron invertidos en equipamiento: atril y cámara con grabación de video en alta definición. Diego y Hernán fundaron Hover, startup que presta servicios de aereofotogrametría, inspección aérea, video, fotografía, publicidad, desarrollo de hardware, robotización y automatización de cámaras.

Diego produce los drones en un taller, con controladores importados. Su colección va desde pequeños robots aéreos hasta octacópteros (ocho motores) de un metro de diámetro, que pueden alcanzar más de 300 metros de altura a una velocidad aproximada de 10 kilómetros por hora. Llevan instalada una cámara HD que graba a 60 cuadros por segundo, lo que les permite tener capturas en cámara lenta en máxima calidad.

Fueron probados en ambientes hostiles, grabaron videos de lagos y ríos y volaron en condiciones de humedad y lluvia de mayor complejidad. “Queremos agregar la componente de ingeniería al trabajo de drones, es decir, que no sea para misiones netamente publicitarias. Quisiéramos que mineras contrataran nuestros servicios para sobrevolar

lugares de difícil acceso, determinar áreas y perímetros y llevar esa información a modelos 3D a través de capturas fotográficas”, señala Diego Ávila, y agrega: “Pensamos en enviar los drones a esos lugares sin necesidad de nuestra presencia física, y que los trabajadores de la mina puedan utilizarlos en la faena. Nosotros haríamos un monitoreo desde Santiago”.

DRONES MADE IN CHILE

Frente a la competencia nacional que tiene Hover, Diego afirma: “Nosotros somos técnicos, tenemos un mayor control sobre las máquinas y queremos sumar habilidades y conocimientos ingenieriles a esta industria. No nos planteamos solamente elaborar videos comerciales, sino además incorporar una cámara infrarroja, por ejemplo. Queremos hacer volar los drones y luego contar con expertos en computación para analizar las imágenes captadas, con el fin de encontrar cosas interesantes”.

Diego anima a los estudiantes que están pensando en trabajar con drones a que se atrevan a experimentar en esta industria. “Hay muchas oportunidades, es una tecnología que se está masificando y se pueden realizar muchas cosas aún. No por funcionar en Chile estamos en desventaja frente a empresas de Estados Unidos, por ejemplo. Tenemos suficientes herramientas”, asegura.

07

Investigaciones
de alumnos

“ Lo que sabemos
es una gota, lo que
no sabemos es un
océano ”

Isaac Newton



Análisis acústico de geodomas semiesféricos

Nicolás Schmidt¹, alumno de sexto año

Juan Pablo Cáceres², investigador guía

¹DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN, ESCUELA DE INGENIERÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

²CENTER OF COMPUTER RESEARCH IN MUSIC AND ACOUSTICS, Y MUSICIANLINK INC., STANFORD UNIVERSITY

INTRODUCCIÓN

Durante el último tiempo, tanto en Chile como en otros países, se ha extendido notablemente el uso de geodomas semiesféricos como alternativa a la construcción de nuevos espacios. El uso creciente de estas estructuras se explica por su bajo costo y facilidad en su implementación.

Sin embargo, estos domos presentan una acústica que no favorece su uso como salas de estudio. Este problema se manifiesta en la presencia de una gran **reverberación**. Es por esto que surge la necesidad de idear alguna solución acústica para aplicarla a cualquier domo, independiente de su tamaño.

En esta investigación se estudió y modeló acústicamente uno de los geodomas semiesféricos ubicados en la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, con el fin de encontrar la ubicación óptima para la instalación de alguna medida basada en la absorción

y disipación del sonido. Se logró encontrar aquellas paredes que generan las mayores sumas de intensidades de respuesta al impulso, para un escenario en el que se tienen fuentes sonoras provenientes desde múltiples ubicaciones al interior del geodomo. Sobre la base de ello, se propuso una solución práctica. El desempeño de esta fue analizado en base a la comparación del **Power Spectral Density**, para aquellos pares fuente-auditor que generaban fuentes virtuales más energéticas, con y sin la solución.

METODOLOGÍA

Modelo acústico

La modelación se fundamentó en la implementación de un algoritmo que otorgara los elementos necesarios para encontrar la respuesta al impulso para un **par fuente-auditor** dentro de cualquier espacio cóncavo [1]. La estructura se modela como un conjunto de planos en el espacio, cada uno representado por tres puntos arbitrarios. Además, deben ingresarse las coordenadas de la fuente sonora y del auditor al interior de ella. El algoritmo simula las reflexiones en las paredes de la estructura con fuentes sonoras virtuales. Se crea un punto que representa una fuente sonora virtual para cada pared de la estructura. Este punto está ubicado en línea recta al doble de la distancia mínima entre la pared correspondiente y la fuente sonora original. Cada fuente virtual es finalmente evaluada respecto de los tests de validez, visibilidad y proximidad descritos en [1], con lo que se establece su validez, eliminándose aquellas que quedan fuera del rango físico posible de reflexiones.

Con la metodología descrita, se encuentran todas las fuentes sonoras virtuales válidas creadas a partir de la reflexión de un impulso sonoro sobre todas las paredes de la estructura en forma recursiva. Así, se crea una serie de fuentes virtuales, las cuales pueden ser ordenadas como un árbol, en el cual el nodo padre es el inicio de la onda original, y todos los nodos intermedios y hojas son fuentes virtuales creadas por la reflexión de otra fuente virtual válida en las paredes. Este método se detiene al alcanzar cierto nivel de recursión, dependiendo de la precisión que se requiera en el cálculo.

Una vez identificada la posición de todas estas fuentes virtuales válidas, se calcula el **delay** del sonido en llegar desde una determinada fuente al auditor, junto con la intensidad con la que este rebota, considerando el coeficiente de reflexión (que determina cuánta energía es reflexionada por el material) de la pared que generó la determinada fuente y cuántas veces el sonido ha rebotado. A partir de estos datos se determina una respuesta al impulso para el par fuente-auditor, la que es construida sobre la base de la superposición de todos los impulsos creados por las fuentes virtuales, cuyos parámetros son amplitud y *delay*.

Al algoritmo se le ingresaron las coordenadas de cada vértice de un geodomo ubicado en la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, simplificado de tal manera de generar una estructura radialmente simétrica respecto del centro y completamente cóncava. Para mantener la simetría del análisis, el acceso a la estructura fue reemplazado por una sección del domo de iguales proporciones, pero manteniendo su concavidad. La estructura es de 12 m de diámetro y 6 m de alto, con coeficientes de reflexión acústica de las paredes y suelo iguales a 0,8 y 0,75 respectivamente. De esta manera, se implementó la modelación computacional que emula la respuesta al impulso para cualquier par fuente-auditor al interior del domo.

Validación experimental del modelo

El primer paso fue realizar un levantamiento significativo de respuestas al impulso representativas al interior del geodomo. Para esto se utilizó un procedimiento experimental basado en la grabación desde un punto determinado el sonido de la explosión de un globo [2], el cual se ubica en otra posición específica. El globo representa la fuente sonora y el micrófono, el auditor. El muestreo de respuestas al impulso dentro del domo se realizó utilizando el supuesto de simetría radial de la estructura con respecto del centro. De esta forma, se grabó el sonido de la explosión de globos distribuidos uniformemente dentro del domo, desde cuatro ubicaciones específicas (Figura 1). Debido a la simetría radial del domo, esta información es suficiente para caracterizar la respuesta al impulso para cualquier par fuente-auditor dentro del domo, con la precisión espacial de la Figura 1.

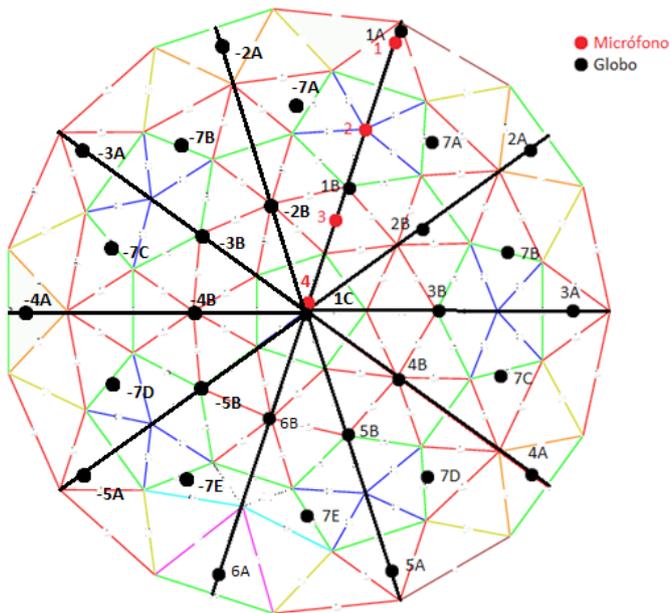


Figura 1. Mapa de muestra.

Para realizar una correcta comparación, al modelo se le ingresaron los datos de la estructura del domo y una lista con las posiciones de los micrófonos y de los globos muestreados anteriormente. De este modo, cada respuesta al impulso entregada por el modelo para cada par fuente-auditor, tiene un símil grabado con el cual compararse.

Las respuestas al impulso obtenidas para cada par fuente-auditor del modelo fueron cuantificadas a una frecuencia de muestreo de 705,6 kHz (16 veces mayor a la utilizada en la grabación de 44,1 kHz), interpolando linealmente para obtener los puntos cuantificados. Estas se resampearon a 44,1 kHz, de modo de poder compararlas con los registros efectuados. En las Figuras 2 y 3 se muestra un par de ejemplos donde se compara la respuesta modelada y la grabada, para dos pares fuente-auditor.

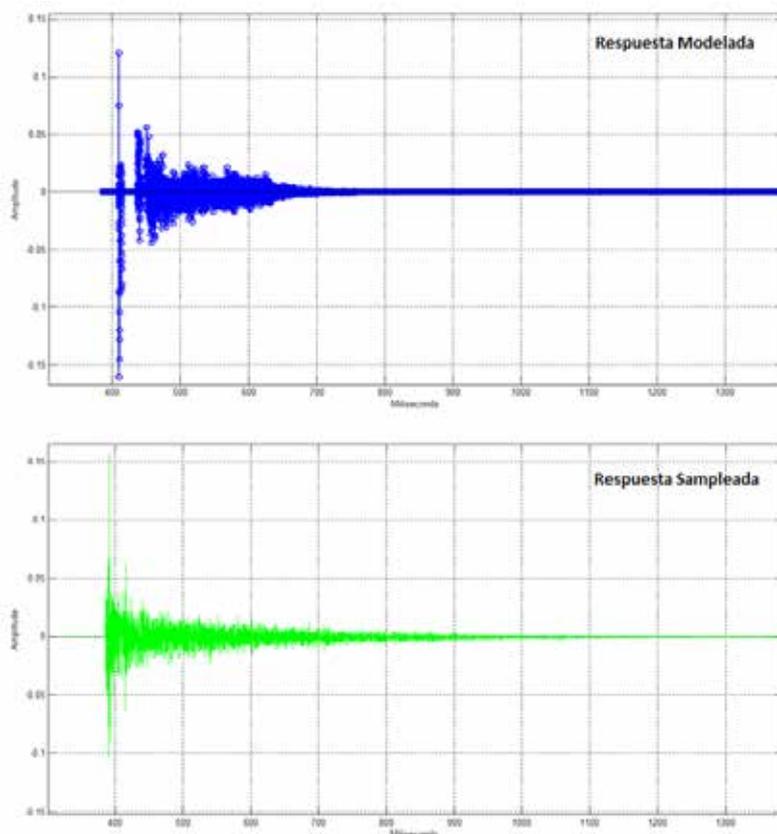


Figura 2. Comparación entre respuestas para el auditorio 1 y fuente 4a para 12 niveles de recursividad.

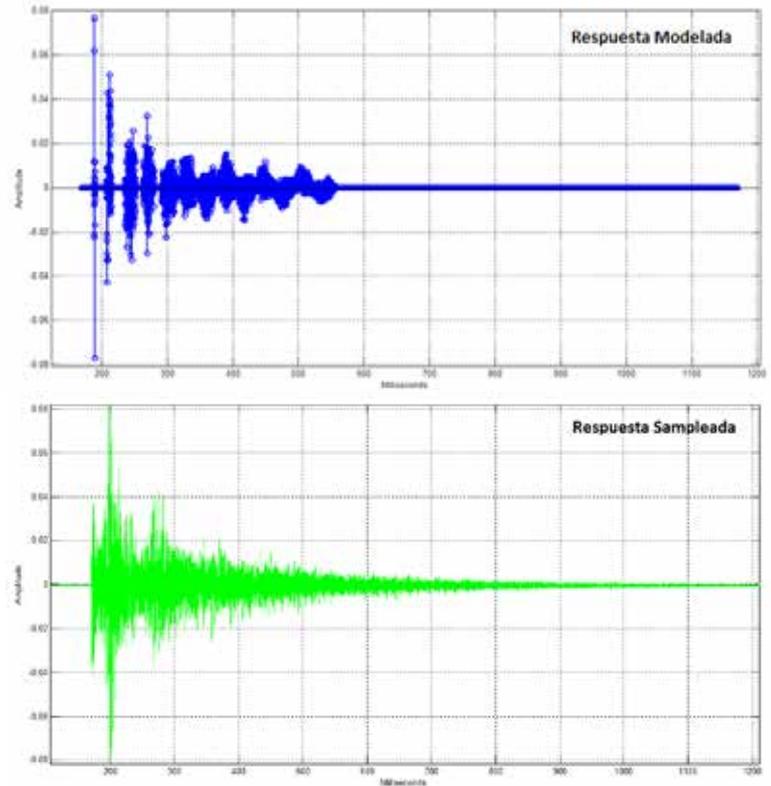


Figura 3. Comparación entre respuestas para el auditor 3 y fuente 5a para 12 niveles de recursividad.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Búsqueda de las paredes más conflictivas

Como este problema se centra en el auditor ya que es él quien, en definitiva, percibe la reverberación, es vital encontrar para cada posición dentro del domo cuáles son las paredes que generan las fuentes virtuales que reproducen el sonido con mayor intensidad. La importancia de esta búsqueda radica en que al encontrar las zonas más conflictivas para cada auditor, se pueden ordenar según intensidad y luego aplicar la solución a las paredes que lideran la lista para disminuir notablemente la reverberación. Para encontrar aquellas zonas de interés, se parte de la base de que pueden existir ondas sonoras provenientes de cualquier punto del domo, por lo tanto, se fija la posición del auditor y se buscan las paredes más conflictivas para todas las fuentes sonoras dentro de la estructura.

Debido a la ya mencionada simetría radial respecto del centro, la búsqueda de las paredes más conflictivas se realizó radialmente, con el fin de revolucionar esta solución en torno al centro de la estructura y encontrar las paredes críticas para cualquier auditor. Para la comparación se tomaron las mismas posiciones en las que hubo micrófonos cuando se realizaron los muestreos al interior del domo, es decir, a 0; 1,67; 3,34 y 5 metros del centro del domo.

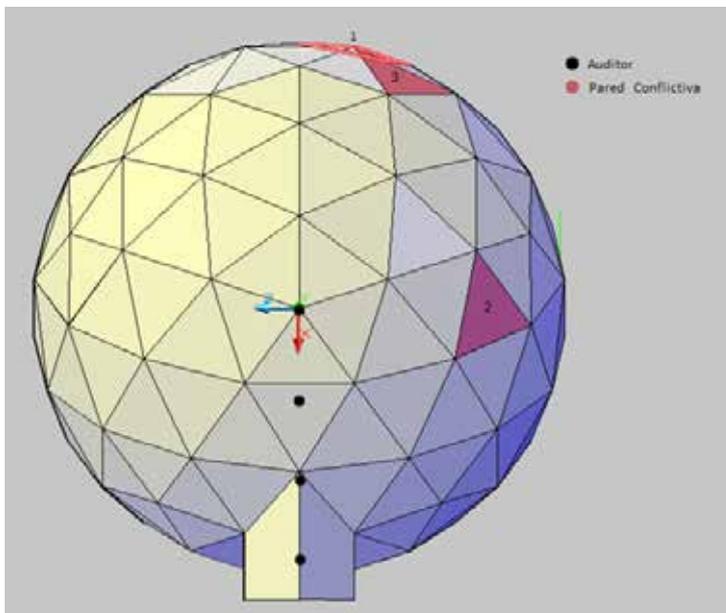
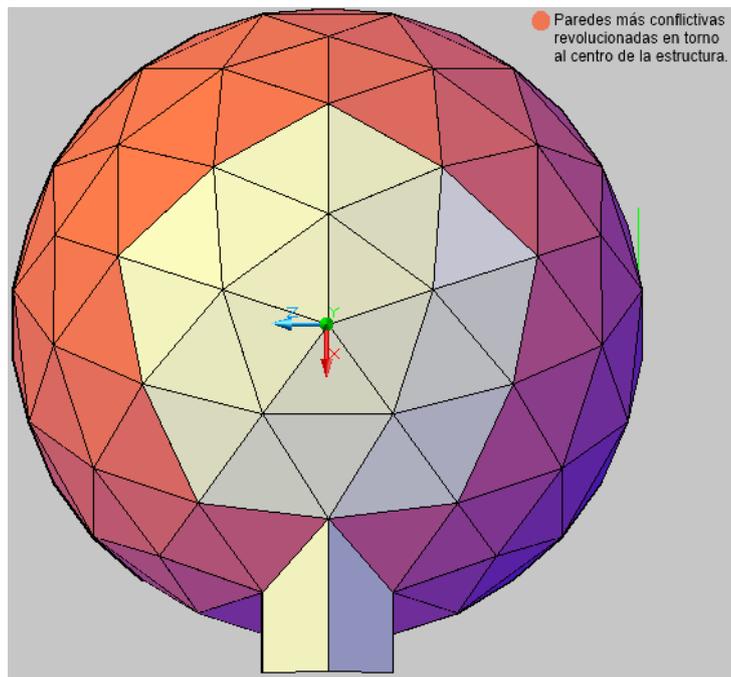
El método de búsqueda consistió en guardar en un arreglo para cada auditor la suma de intensidades en valor absoluto de cada una de las fuentes generadas, por cada pared del domo. Esto quiere decir que en cada posición del arreglo existe la suma de las intensidades de las fuentes virtuales que fueron generadas por la pared del domo asociada a la posición del arreglo.

Este procedimiento se realiza para cada uno de los auditores, por lo que se obtienen cuatro arreglos de paredes ordenadas de forma decreciente de acuerdo a las paredes más energéticas. La búsqueda arrojó que las tres paredes más conflictivas del domo coinciden para los cuatro auditores, y son aquellas que se encuentran en la parte más baja de la estructura. Esto puede verse en la Tabla 1. Las superficies encontradas son aquellas destacadas en la Figura 4.

Ya que este análisis se hizo para la ubicación de cuatro auditores, según muestra la Figura 1, la posición de las tres paredes más conflictivas corresponden a estos auditores. Luego, por simetría radial respecto del centro, se determinó que las superficies en las cuales había que instalar una solución acústica son las mostradas en la Figura 5.

Tabla 1. Suma de las intensidades en valor absoluto de las 13 paredes más conflictivas para cada auditor.

	Auditor 1	Auditor 2	Auditor 3	Auditor 4
Pared 1	12,27	11,45	10,1	9,45
Pared 2	11,99	11,31	9,97	9,42
Pared 3	11,09	11,21	9,96	9,4

**Figura 4.** Las tres paredes más conflictivas.**Figura 5.** Posición de las tres paredes más conflictivas para todos los auditores dentro del domo.

Solución propuesta

La solución propuesta consiste en instalar complejos piramidales de base triangular de espuma de poliuretano y madera en las paredes más conflictivas identificadas. Estos complejos se instalarán en los casquetes planos formados por la intersección de los soportes de la estructura. La madera tiene como principal objetivo absorber el campo de frecuencias más graves (menores a 5kHz), como aislante de membrana. La espuma de poliuretano, por su parte, tiene la función de absorber las frecuencias más

agudas (mayores a 5kHz). Sólo en términos de materiales, cada una de estas pirámides tiene un coeficiente de reflexión acústica aproximado de 0,1.

La forma de pirámides de base triangular se propuso principalmente para aprovechar los casquetes planos creados por la estructura del domo. Junto con la absorción, se busca crear relieve interno en las paredes de la cúpula, de manera que la onda sonora que no es absorbida, en lugar de seguir su curso por el techo curvo del domo, sea desviada hacia otros complejos de espuma, tal como se muestra en la Figura 6. Dado que cada pirámide tiene un coeficiente de reflexión aproximado de 0,1, y su ubicación favorece que el sonido se reflexione de complejo en complejo, se puede hacer la aproximación de que la superficie cubierta por estas soluciones tiene un coeficiente de reflexión total cercana a 0.

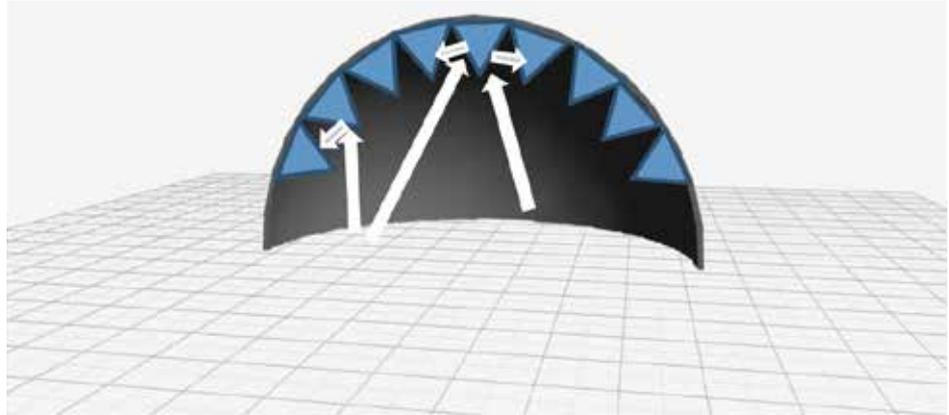


Figura 6. Efecto del relieve creado por los complejos de espuma, en la dirección de reflexión.

Las paredes más críticas se encuentran en la parte del domo más utilizada por los usuarios por lo que la instalación de estos complejos en dicha zona dificultaría el tránsito por el domo. Por ello se plantea que se reemplacen los complejos de esa zona por planchas de espuma de poliuretano de 50 mm de grosor (Sonex, coeficiente de absorción cercano a 0,1) y se restringe la instalación de complejos a la zona de la Figura 7.

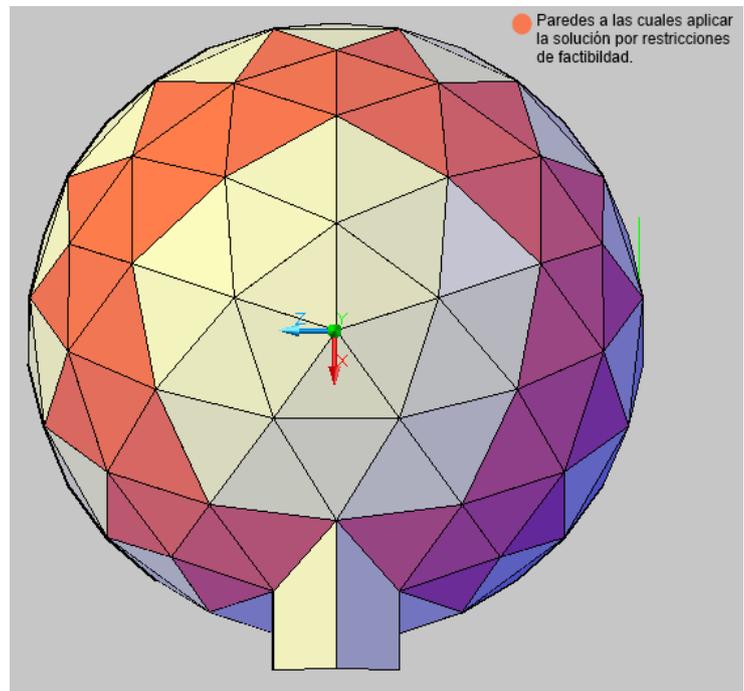


Figura 7. Paredes conflictivas consideradas para la solución.

Junto con la implementación de los complejos y planchas de espuma de poliuretano, se postula instalar alfombras mullidas en el piso de la estructura. El coeficiente de reflexión de este tipo de alfombras, para los rangos de frecuencia de la voz es cercano a 0,5, pero en conjunto con el coeficiente de reflexión del piso de madera, el coeficiente total queda cercano a 0,2.

Se realizaron modelaciones comparando la estructura con y sin la solución propuesta, de forma de contrastar y medir el efecto de la misma. Los datos ingresados permitieron crear nuevas respuestas al impulso para cada par fuente-auditor. En particular se centró la atención en el caso del auditor 3 y la fuente sonora 6b, dado que es el par que más fuentes virtuales generó en el análisis sin agregar elementos absorbentes.

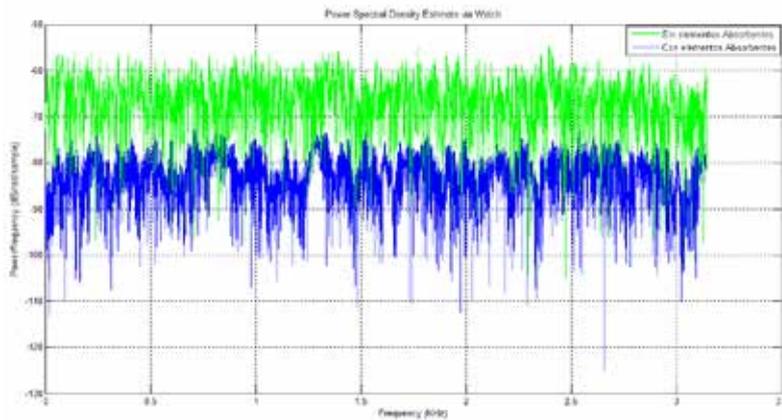


Figura 8. Power Spectral Density para el auditor 3 y fuente 3b para los tres primeros niveles de recursividad, con y sin la solución propuesta.

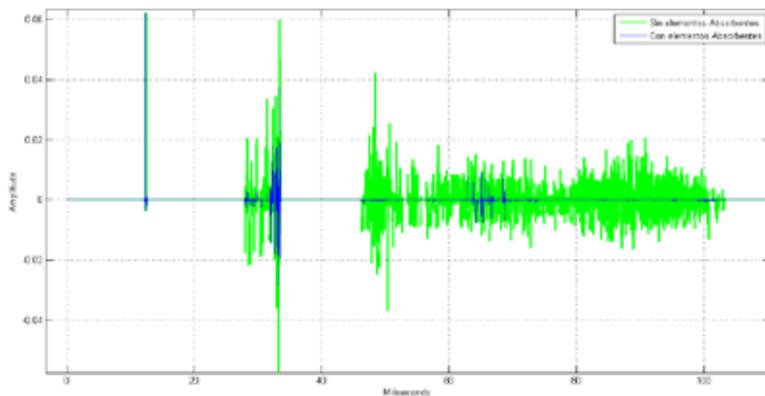


Figura 9. Respuesta al impulso para el auditor 3 y fuente 3b para los tres primeros niveles de recursividad con y sin la solución propuesta.

La respuesta acústica mejora considerablemente en lo que concierne a la reverberación del domo cuando se le añaden elementos absorbentes. En la Figura 8, se puede ver que los niveles de energía se reducen considerablemente llegando a reducirse en promedio 22 decibeles. También se puede apreciar claramente en la Figura 9 que la intensidad de la respuesta al impulso decrece considerablemente. Junto con esto, es posible ver cómo las respuestas que tienen llegadas tardías disminuyen en intensidad, llegando prácticamente a desaparecer luego del tercer nivel de recursividad.

CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación, se pudo encontrar la respuesta al impulso para todo par fuente-auditor dentro de los geodomas semiesféricos. Junto con eso, se pudo identificar aquellos sectores más vulnerables acústicamente. Estas zonas resultaron ser las paredes del domo que se encuentran en los tres primeros niveles de la estructura.

Se propuso una solución concreta, consistente en la instalación de complejos de poliuretano piramidales, planchas del mismo material y alfombras mullidas. La propuesta se analizó, y se comparó con las respuestas al impulso obtenidas por el modelo previamente diseñado. A partir de eso, se pudo concluir

que la alternativa propuesta solucionaría el problema acústico en los domos, reduciendo los niveles de energía por frecuencias en promedio 22 dB/(rad*muestra) y disminuyendo notablemente el ruido asociado a las respuestas al impulso.

Junto con lo anterior, y dado que el análisis se hizo principalmente desde un punto de vista geométrico, es posible concluir que la metodología, el modelo y la solución propuesta son extensibles a geodomas de distintas dimensiones al estudiado. Otros domos de distintas dimensiones, pero que mantengan la geometría, pueden adaptar la solución y extenderla de manera directa, con resultados similares.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Para el cálculo de la respuesta al impulso para un par fuente-auditor dentro de la estructura se utilizó el cálculo de *delays* e intensidad para cada fuente virtual generada de la siguiente forma:

$$\text{Delay}_i = \frac{\text{Distancia (Fuente}_i \text{ - Auditor)}}{\text{Velocidad del sonido}}$$

$$\text{Intensidad}_i = \frac{\text{Distancia (Fuente Original - Auditor)}}{\text{Distancia (Fuente}_i \text{ - Auditor)}} * \prod_{s=1}^S \text{Coficiente}_s$$

S = todas las paredes en que la fuente fue reflexionada

GLOSARIO

Reverberación: Fenómeno producido por la reflexión, que consiste en una ligera permanencia del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo.

Power Spectral Density: Función matemática que informa cómo está distribuida la potencia o la energía (según el caso) de una señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada.

Delay: Tiempo que tarda en ser percibido por un auditor una señal producida desde que fue reproducida por su fuente sonora.

Par fuente-auditor: Dupla que determina las posiciones en términos de coordenadas de una fuente sonora y un auditor. Para cada par fuente-auditor existe una respuesta al impulso distinta asociada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al profesor Daniel Hurtado por facilitar los planos de los domos.

REFERENCIAS

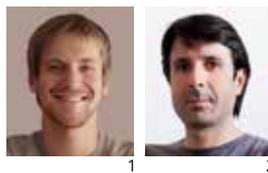
[1] Borish, J. Extension of the image model to arbitrary polyhedral. Journal of the Acoustical Society of America. 75 (6): 1827-1836, 1984.

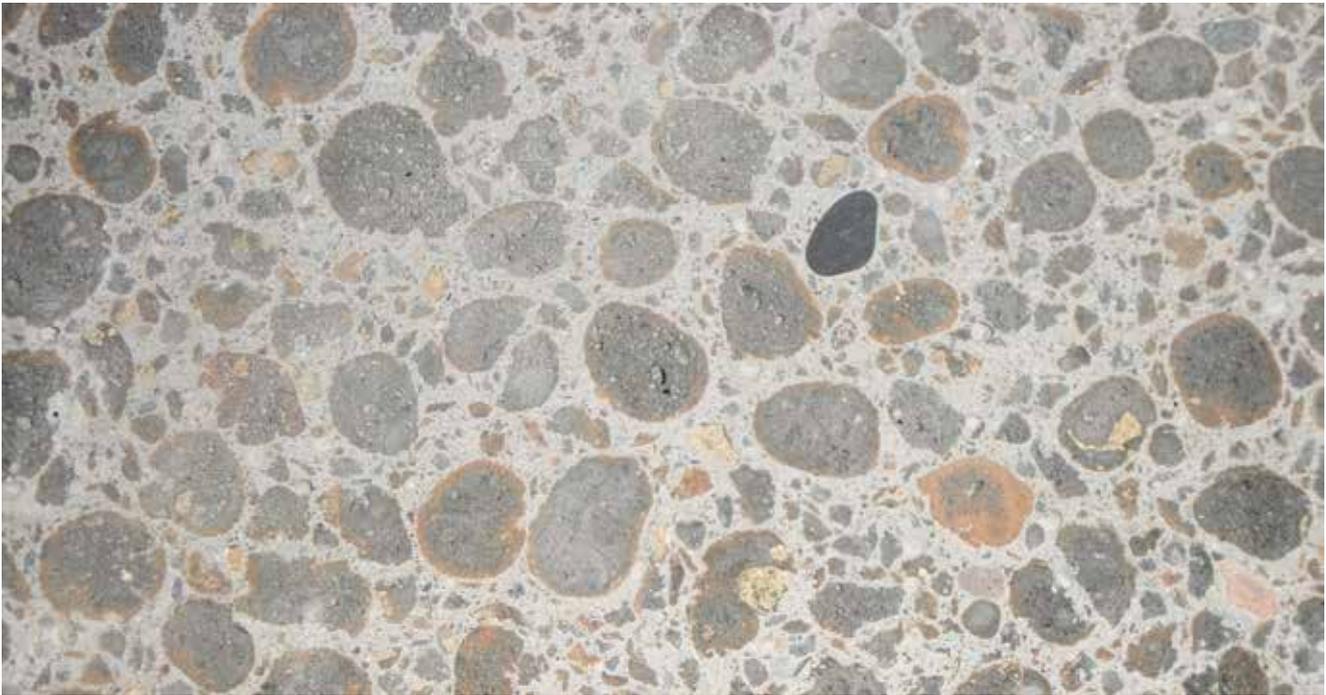
[2] Abel, J. S., Bryan, N. J., Huang, P. P., Kolar, M. A., Pentcheva, B. V. Estimating room impulse responses from recorded balloon pops. 129 Convention of the Audio Engineering Society, 2010.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Nicolás Schmidt

2 Investigador guía Juan Pablo Cáceres





Impacto del curado interno en pavimentos de hormigón

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Iván Navarrete¹, alumno de sexto año

Ismael Gottreux², alumno de sexto año

Mauricio López¹, profesor asociado

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

²DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICA

INTRODUCCIÓN

Los pavimentos de hormigón presentan una gran área expuesta al secado y, por lo tanto, registran mayores pérdidas de agua y descensos en su humedad interna respecto del común de las estructuras de hormigón. Por ello, particularmente en estas estructuras es muy importante asegurar un buen proceso de **curado**, para lograr un correcto desempeño del hormigón [1]. En los casos donde no se provee un curado adecuado ocurre **retracción plástica**, **retracción hidráulica**, **retracción térmica**, grietas, **alabeo** y todo tipo de problemas que ocasionan una disminución en la durabilidad y resistencia [2].

Para que ocurra una hidratación adecuada de los **materiales cementicios**, la mezcla de hormigón debe tener una humedad interna relativa mayor al 80% [3].

Además, las prácticas actuales muestran una tendencia a usar cementos de alta resistencia temprana, provocando un incremento en la velocidad de hidratación y una reducción anticipada en la permeabilidad del hormigón. Ambos factores producen que el sistema tradicional de curado, que provee agua desde el exterior, sea insuficiente para asegurar una correcta hidratación de los materiales cementicios [4]. Como respuesta a estas necesidades surge el uso de técnicas de curado interno del hormigón.

Investigaciones recientes han estudiado la inclusión de materiales, entre los que se encuentran polímeros superabsorbentes y **agregados livianos**, como reservorios de agua para curado interno y

reducción de la retracción en hormigones de alto desempeño [5-9]. Como resultado de dichas investigaciones se obtuvo que el uso de hormigones de alto desempeño con suministros de agua almacenada internamente permite mejorar la resistencia al secado, retracción y agrietamiento en pavimentos.

El objetivo de esta investigación es demostrar las ventajas del uso de agregados livianos como agente de curado interno en hormigones empleados en la construcción de pavimentos. Estos agregados livianos reemplazan parte del agregado fino convencional de la mezcla (Tabla 1).

METODOLOGÍA

Se fabricaron dos mezclas de hormigón: una de tipo convencional (control) y otra con árido liviano como agente de curado interno (LWAC). El árido liviano utilizado para realizar la investigación fue **arcilla expandida**. Las dosificaciones empleadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación para el hormigón convencional (control) y el hormigón con curado interno (LWAC)

Material	Control [kg/m ³]	LWAC [kg/m ³]
Cemento (Portland puro)	474,4	474,4
Agua	199,2	199,2
Agregado grueso (gravilla)	907	907
Superplastificante (Glenium 3030)	3,8	3,8
Agregado fino (arena)	891,8	183,5
Agente de curado interno (arcilla expandida)	0	438,3
Agua de curado interno	0	94

Los ensayos realizados en esta investigación se dividieron en dos fases. En la primera etapa, se llevaron a cabo con el fin de determinar las propiedades mecánicas de ambas mezclas; en la segunda etapa, se midieron los contenidos de humedad interna y los cambios volumétricos asociados.

Así, en la primera etapa se midió la resistencia a la compresión, la tracción indirecta y el módulo de elasticidad, ensayando tres probetas para cada medición a 3, 7, 28 y 365 días. La resistencia a la compresión y la tracción indirecta fueron determinadas ensayando probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, acorde a lo establecido en las normas ASTM C39 [10] y ASTM C496 [11], respectivamente. Por otro lado, el módulo de elasticidad fue medido utilizando probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, según lo planteado en la norma ASTM C469 [12].

En tanto, en la segunda etapa se valorizó la pérdida de agua en probetas con una sola cara libre, con el objetivo de replicar las condiciones en terreno de los pavimentos. Las probetas consistieron en viguetas de 8 cm x 15 cm x 50 cm, a las cuales se les controló su peso semanalmente. Además, se midió la retracción hidráulica, para lo cual se emplearon tres probetas de 10 cm x 10 cm x 30 cm a las cuales se les realizaron mediciones semanales según la norma ASTM C157 [13]. Por otro lado, haciendo uso de tres probetas de 10 cm x 10 cm x 30 cm, con una sola cara descubierta, se midió también semanalmente la humedad relativa a distintas distancias a la cara libre. Toda esta fase investigativa fue desarrollada durante cuatro meses.

Todas las probetas ensayadas fueron desmoldadas a la edad de un día y se mantuvieron en una cámara de secado a 20°C y 50% de humedad relativa, hasta la fecha en la que fueron ensayadas con el objetivo de simular condiciones adversas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades mecánicas

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión en probetas cilíndricas de ambas mezclas se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de resistencia a la compresión

	Resistencia a compresión [MPa]			
	3 días	7 días	28 días	365 días
Control	46,5	53,1	62,4	58,0
LWAC	37,3	43,9	51,6	50,8

En los resultados se observa que el hormigón de control presenta una resistencia mayor a la compresión que el hormigón con curado interno en todas las edades ensayadas. Sin embargo, la diferencia entre ambas mezclas va disminuyendo con la edad, partiendo con un 20% de diferencia a los tres días y terminando con una diferencia del 12,5% a los 365 días (Tabla 2). Además, se puede apreciar que en condiciones adversas de humedad y temperatura (50% y 20°C) la resistencia a compresión a 365 días es menor a la resistencia a 28 días en el hormigón de control, mientras que en el hormigón con curado interno se presenta una disminución despreciable.

Los resultados de los ensayos de resistencia a tracción indirecta en probetas cilíndricas de ambas mezclas se resumen en la Tabla 3.

De estos resultados es importante destacar que, al igual que en la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción del hormigón de control es mayor que la del que presenta LWAC a edades tempranas (3, 7 y 28 días). Sin embargo, a edades tardías (365 días) la resistencia a la tracción del hormigón de control es inferior a la del hormigón con curado interno, lo cual se evidencia en el brusco descenso que presenta la mezcla control entre los 28 y los 365 días.

Estado de hidratación

Los resultados del ensayo de variación de humedad (%) (Figura 1) en hormigón de control y en hormigón con curado interno muestran que la humedad relativa del material con LWAC fue en todos los casos mayor a la obtenida en el hormigón de control a profundidades de 5, 10 y 15 cm respectivamente (Tabla 4).



Tabla 3. Resultados de resistencia a la tracción

	Resistencia a tracción [MPa]			
	3 días	7 días	28 días	365 días
Control	4,2	4,3	4,7	3
LWAC	3	3,3	3,8	3,9

Tabla 4. Resultados de la humedad relativa

Profundidad [cm]	HR [%] Control	HR [%] LWAC
5	65,8	81,6
10	69,1	87,6
15	80,2	92,1

Lo anterior se cumple cuando el nivel de curado varía según profundidad, dado que para ambas muestras los porcentajes de humedad que se detallan en la Tabla 4 son mayores conforme aumenta la profundidad del muestreo. El mayor porcentaje de humedad representa una mayor fuente de agua disponible en la medida que el hormigón la necesite, y un curado más prolongado.

Los resultados de la retracción total a lo largo de 80 días se resumen en la Figura 2, en el cual puede observarse que en todo momento el hormigón con curado interno se retrae menos que el de control. En la práctica, esto se traduce en una disminución en la aparición de grietas y fisuras en pavimentos.

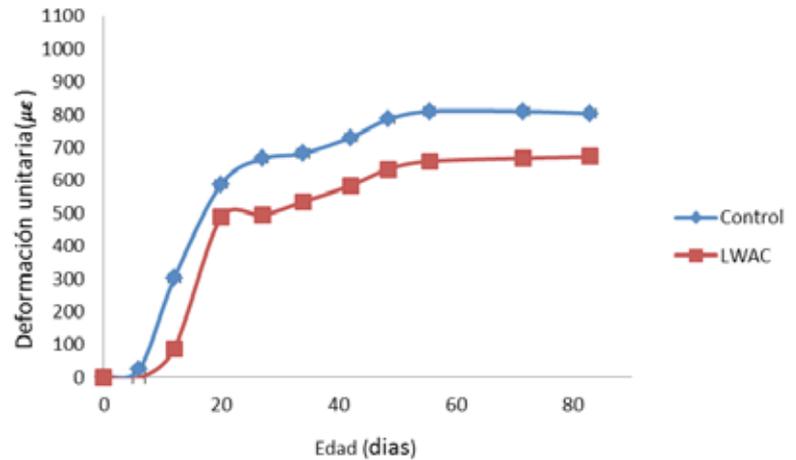


Figura 2. Evolución de la retracción total del hormigón control y del hormigón con curado interno.

La evaporación de agua (pérdida en peso) de las probetas a los 34 días de secado fue de 400 g (30 g/kg) y 150 g (10 g/kg) para hormigón con curado interno y hormigón de control respectivamente. Si bien la pérdida por agua es evidentemente mayor en el hormigón con curado interno, este se encuentra significativamente más hidratado que el hormigón de control, debido al propio proceso de curado.

Solicitaciones

A partir de la retracción y el módulo de elasticidad medidos se calcularon los esfuerzos a los cuales estarían solicitados ambos hormigones debido a la retracción hidráulica. En la Figura 3 se puede apreciar que incluso en edades tempranas las solicitaciones en el hormigón control son considerablemente mayores que las ocurridas en el hormigón con curado interno, diferencia que va aumentando en el tiempo, llegando a ser aproximadamente el doble a la edad de 80 días. Esto se explica debido a que el hormigón de control presenta una retracción hidráulica y un módulo de elasticidad mayor que el hormigón con curado interno, por lo tanto, los esfuerzos generados por dicha retracción son mayores.

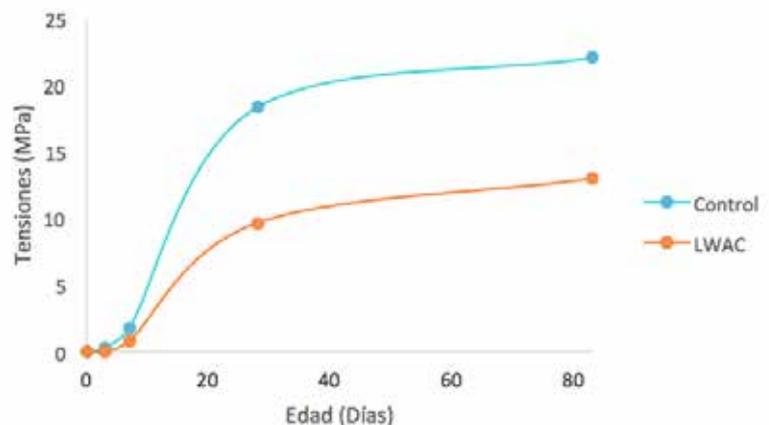


Figura 3. Esfuerzos inducidos en el hormigón a distintas edades.

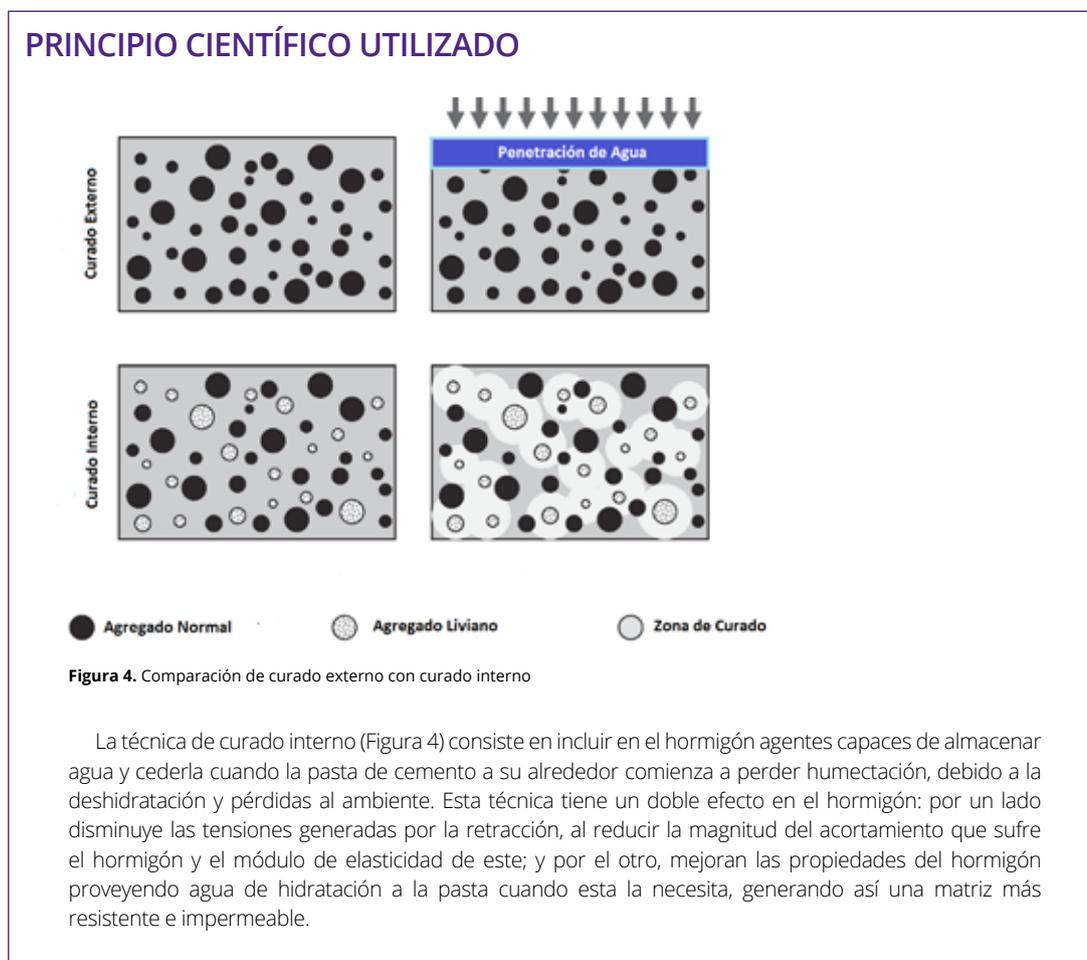
CONCLUSIONES

A edades tempranas (tres días), tanto la resistencia a la compresión como a la tracción son menores en el hormigón con curado interno. Esta diferencia se va reduciendo con el paso del tiempo y, a edades tardías (365 días), la resistencia a tracción del hormigón con curado interno incluso es mayor que la del hormigón de control. Esto indica que el desempeño del hormigón con curado interno es competitivo con el de los hormigones que existen actualmente en el mercado.

El uso de curado interno permite una disminución en la pérdida de humedad del hormigón en todas las edades medidas, lo cual produce una baja considerable en la retracción hidráulica, disminuyendo las tensiones inducidas en el material.

Los esfuerzos generados sobre el hormigón con curado interno por retracción son considerablemente menores a los generados en el hormigón de control. Si además se considera que la resistencia a tracción de ambos materiales es similar en las distintas edades, se puede concluir que el uso de curado interno es potencialmente una buena técnica para aminorar la aparición de grietas en los hormigones de pavimento y, por lo tanto, mejorar su durabilidad.

Para realizar esta investigación se utilizaron probetas que no representan la relación área/volumen de los pavimentos. Por esta razón, se propone que en una futura etapa de investigación, se haga uso de probetas que representen de mejor manera las condiciones reales de los pavimentos.



GLOSARIO

Curado: Proceso de conservación del hormigón en los primeros días de fabricación. Principalmente se trata de suministrar agua de forma apropiada, ya sea mediante vapor o inmersión.

Cemento Portland puro: Conglomerante que actúa cuando es hidratado. Fue el primer cemento hidráulico que se estandarizó.

Materiales cementicios: Todos aquellos materiales que se agregan al hormigón y que tienen propiedades conglomerantes.

Retracción hidráulica: Variación de volumen producida por la pérdida de agua en poros y capilares en el hormigón.

Retracción plástica: Variación de volumen producida mientras el hormigón está todavía en estado fresco. La pérdida de agua por evaporación de la superficie del hormigón agrava la retracción plástica y puede llevar a un agrietamiento superficial.

Retracción térmica: Variación de volumen producida por una disminución importante de la temperatura en piezas de hormigón.

Alabeo: Deformación de una superficie plana de cualquier material, por acción del calor, humedad, etc., de manera que no puede coincidir con un plano.

Arcilla expandida: Árido cerámico de baja densidad. Su granulometría puede fluctuar desde los 10-16 mm hasta diámetros inferiores a los 5 mm. En general, cuanto más grande sea el tamaño del grano, menor será la densidad del material, que oscila entre los 325 kg/m³ y los 950 kg/m³. Esta densidad es hasta cinco veces menor a la de la arcilla común.

Agregados livianos: Agregados naturales o artificiales compuestos por partículas con una estructura porosa, cuya masa específica es menor de 2.000 kg/m³.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al profesor Javier Castro S., por su constante apoyo en el desarrollo de este proyecto de investigación; a los técnicos de laboratorio del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, por su colaboración y apoyo; y al grupo de analistas del área cementos del laboratorio RESMAT, por su ayuda y respaldo.

REFERENCIAS

- [1] Espinoza-Hijazin, G., López, M. Extending internal curing to concrete mixtures with W/C higher than 0,42. *Construction and Building Materials* 25(1): 1236-1242, 2011.
- [2] López, M., Kahn, L., Kurtis, K. High-strength self-curing low-shrinkage concrete for pavement applications. *International Journal of Pavement Engineering* 11 (5): 333-342, 2010.
- [3] Mindess, S., Young, F., Darwing, D. *Concrete*. 2a. edición. New York, Prentice Hall, 2003.
- [4] López, M., Kahn, L., Kurtis, K. Internal curing in high performance concretes-a new paradigm. *Revista Ingeniería de Construcción* 20 (2): 117-126, 2005.
- [5] Philleo, R. Concrete science and reality, en *Materials science of concrete II*. American Ceramic Society, Westerville, Ohio: 1-8, 1991.
- [6] Webe, S., Reinhardt H.W. A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing. *Advanced Cement Based Materials* 6 (2): 59-68, 1997.
- [7] Jensen, O.M., Hansen, P.F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research* 31(2): 1859-1865, 2001.
- [8] Jensen, O.M., Hansen, P.F. Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. *Cement and Concrete Research*.31(4): 647-654, 2001.
- [9] Kovler, K., Jensen, O.M. Novel techniques for concrete curing - new methods for low w/cm mixtures. *Concrete International* 27(9): 39-42, 2005.
- [10] Norma ASTM C39, 2009, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International, DOI: 10.1520/C0039_C0039M-09a.
- [11] Norma ASTM C496, 2004, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. DOI: 10.1520/C0496_C0496M-04E01.
- [12] Norma ASTM C469, "Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, DOI:10.1520/C0469-02E01.
- [13] Norma ASTM C157, "Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete". ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Iván Navarrete
- 2 Ismael Gottreux
- 3 Profesor Mauricio López





Secuestro de carbono en el suelo: cuantificación del potencial de captura en el suelo de un bosque patagónico

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Pablo Busch¹, alumno de tercer año

Athena Carkovic¹, alumna de magíster

Virginia González¹, asistente de investigación

Carlos Bonilla¹, profesor asociado

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

INTRODUCCIÓN

Mediante el proceso de **fotosíntesis** los bosques capturan dióxido de carbono (CO_2) desde la atmósfera y generan materia orgánica a partir del carbono removido del aire. Una parte de esta **materia orgánica** pasa al suelo a través de la descomposición de la biomasa de la madera y de los desechos que genera el árbol, como son ramas, hojas o frutos (Figura 1). Durante el proceso, producto de la respiración de los microorganismos del suelo, se libera nuevamente CO_2 al aire. De esta forma, y dependiendo de las condiciones locales, el suelo puede actuar como un sumidero o como una fuente de carbono. Así, el secuestro del

carbono consiste en remover el CO_2 de la atmósfera a través de las plantas, estabilizarlo y luego fijarlo dentro de los distintos materiales que componen la superficie, lo que reduce su degradación [1]. Este proceso ocurre naturalmente y es típico de los bosques en crecimiento.

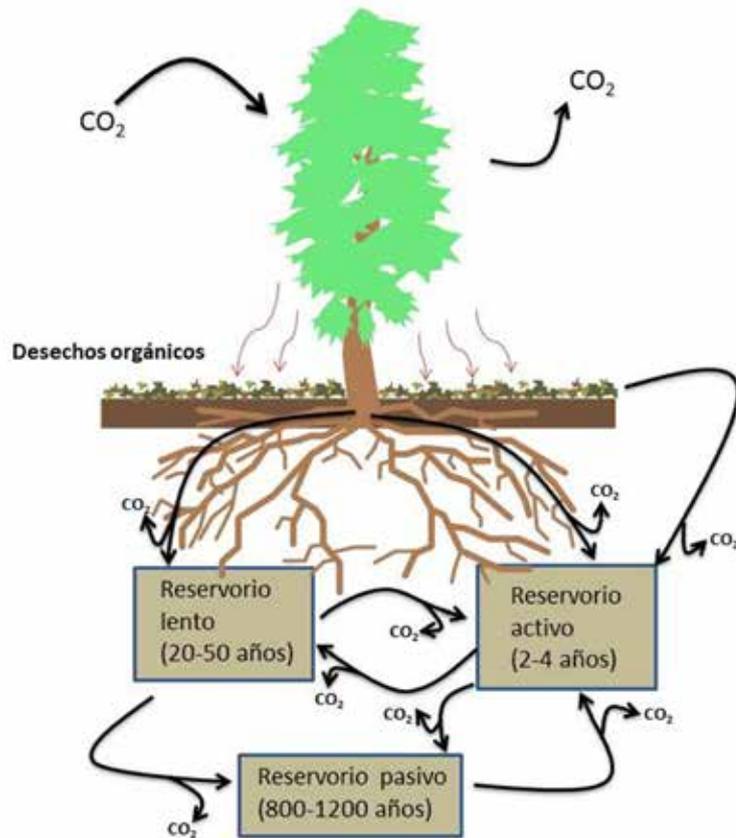


Figura 1. Representación del ciclo de carbono en un bosque acorde al modelo Century (adaptado de [3]). El carbono pasa de una condición a otra con distintas tasas dependientes de la temperatura, humedad y características del suelo. Como referencia, entre paréntesis, se indican los tiempos típicos de permanencia del carbono en cada reservorio.

El secuestro de carbono ha concitado gran interés a nivel mundial, principalmente debido a que la mayoría de los suelos se encuentran por debajo de su capacidad máxima de almacenamiento de carbono [2]. Al comparar el **reservorio** global edáfico, que se estima de 2.500 Gt (1 Gt=10¹⁵ gramos) de carbono, con el contenido de 760 Gt de la atmósfera y de 38.000 Gt del océano [1], es evidente la gran importancia del suelo en el balance global del carbono. La pérdida de este último en una pequeña fracción del suelo podría generar cambios climáticos globales y graves consecuencias en la atmósfera. Recuperar el potencial de carbono en los suelos surge como alternativa para tratar el problema atmosférico mundial. Para analizar esta posibilidad es necesario cuantificar la capacidad y rapidez del suelo para secuestrar carbono.

El objetivo de este estudio es cuantificar el potencial de secuestro de carbono en el suelo de un bosque de la Patagonia chilena. Para ello se utilizó el modelo Century [3] con el cual se estimó la acumulación de carbono en el suelo para un período de 100 años. Century es un modelo especialmente desarrollado para simular los ciclos del Carbono, Nitrógeno, Fósforo y Azufre y de la materia orgánica en ecosistemas terrestres, y ha sido validado en bosques en diversos estudios [4,5]. El modelo Century divide el suelo en tres reservorios: uno activo, uno lento y uno pasivo (Figura 1). El reservorio activo corresponde al material **lábil** del suelo, formado por los primeros productos de la actividad de los microorganismos. Un ejemplo de este material es el **humus**, el cual tiene una alta tasa de degradación. El reservorio lento corresponde a la materia orgánica más estable y con una tasa de descomposición intermedia. Finalmente, el reservorio pasivo corresponde al material químicamente resistente y físicamente protegido, de casi nula descomposición. Los flujos de materia entre cada reservorio se determinan en función de la composición del suelo, la temperatura y la humedad [3].

METODOLOGÍA

Este estudio fue realizado en la cuenca del río Serrano, ubicada en la provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes y Antártica Chilena. Esta cuenca tiene una superficie de 6.673 km², y se sitúa entre los paralelos 50° 33' y 51° 32' S y entre los meridianos 72° 10' y 73° 34' O (Figura 2). La mitad del área de la cuenca forma parte de los parques nacionales Torres del Paine y Bernardo O'Higgins. En la cuenca, destaca la presencia de bosque nativo, donde el tipo de árbol dominante es la **lenga** (*Nothofagus pumilio*) [6], mientras que en suelos predomina el tipo **Phaeozem lúvico** [7]. La zona presenta climas de estepa fría y tundra [8], con precipitaciones que varían entre 200 mm en el sector este, hasta más de 6.000 mm en el sector oeste [9]. Las temperaturas medias mínimas y máximas promedio son 3°C y 11°C, respectivamente.



Figura 2. Ubicación de la cuenca del río Serrano. Se destacan los sectores con suelos del tipo Phaeozem lúvico y con bosque nativo.

Para la cuantificación del potencial de captura de carbono, en Century se representaron los sectores de la cuenca con suelo Phaeozem lúvico y bosques de lenga sin perturbar. En el sitio de estudio, estos sectores cubren una superficie de 290 km² aproximadamente. Se eligió la condición de bosques sin perturbar, pues estos son los más eficientes en la captura de carbono [10]. Adicionalmente se realizó una representación similar, pero utilizando pradera en vez de bosque, con el fin de comparar el secuestro de carbono en el suelo del bosque con el que ocurriría con el tipo de vegetación predominante en la zona (pradera). Ambas simulaciones se hicieron para un período de 100 años.

A partir de muestras de suelo recolectadas previamente en el área, se obtuvieron los principales parámetros de entrada para el modelo, los cuales son: textura del suelo, porcentaje de carbono orgánico y contenido de nitrógeno en los primeros 20 cm de profundidad. Los parámetros climáticos de temperatura y precipitación se obtuvieron a partir de 30 años de registros provenientes de la estación Torres del Paine, perteneciente a la Dirección General de Aguas (DGA). Otros parámetros de entrada fueron estimados a partir de la literatura, tales como el aporte de nitrógeno atmosférico [11], la temperatura óptima para el crecimiento de la lenga [12] y contenidos de biomasa del bosque tipo lenga [13]. Los demás parámetros de entrada se obtuvieron de otros estudios similares [4,5] o de valores propuestos en el modelo Century.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando los tres reservorios, el contenido de carbono en el suelo con presencia de lenga aumentó a una tasa promedio de $18,41 \text{ g C/m}^2$ al año, es decir, el suelo actúa como un sumidero de carbono en esta zona. Si se analiza la evolución en cada reservorio por separado (Figura 3a), se observa que el reservorio activo no sufrió cambios significativos y que el reservorio pasivo perdió carbono a una tasa de $0,9 \text{ g C/m}^2$ al año. Sin embargo, el suelo acumuló carbono a través del reservorio lento a una tasa anual de $17,82 \text{ g C/m}^2$, lo que genera un balance total positivo en el suelo. La pérdida de carbono en el reservorio pasivo puede ser explicada por el bajo contenido de arcilla (21%), debido a que las partículas de arcilla protegen al carbono, disminuyendo su tasa de descomposición [3]. También se comprobó que el contenido de carbono aumenta rápidamente en los primeros años, pero luego tiende a estabilizarse. Esto se debe a que los suelos pueden alcanzar su potencial de contenido de carbono en un período de 25 a 50 años [1], lo que significa que la capacidad edáfica para secuestrar carbono es finita, por lo tanto, esto solo podría servir como una solución a corto plazo al problema atmosférico.

Por otro lado, el contenido de carbono en presencia de pradera disminuyó a una tasa anual de 34 g C/m^2 (Figura 3b). Esto demuestra que el potencial de secuestro de carbono en los bosques de lenga es mayor que en el principal tipo de cubierta vegetal de la zona. Esto implica que la deforestación llevaría a la degradación y pérdida de carbono del suelo a largo plazo, y por otro lado, reforestar las zonas dañadas o sin presencia de bosque generaría beneficios en la mitigación del cambio climático.

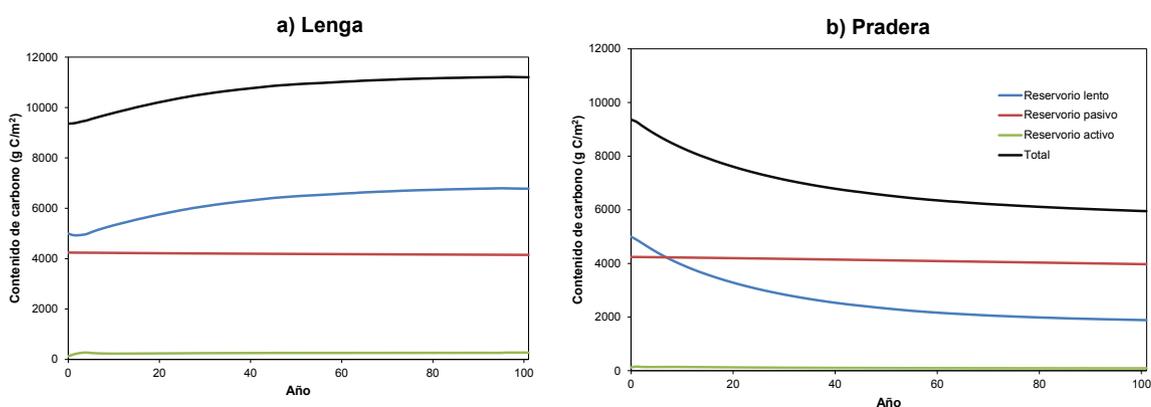


Figura 3. Evolución del contenido total de carbono en el suelo y en sus distintos reservorios. Se comparan dos condiciones, un suelo cubierto con bosque nativo (lenga) y otro con pasto.

El secuestro de carbono no solo implica ganancias ambientales para la zona, sino que también puede generar beneficios económicos. Por ejemplo, los bosques de Costa Rica capturan en promedio 60 g C/m^2 por año, un poco más que el triple que los bosques de lenga, y en base a este secuestro han logrado vender bonos de carbono y al mismo tiempo proteger sus bosques [14]. En el caso de la cuenca del río Serrano, si bien sus tasas de secuestro no son tan altas, su gran extensión permitiría acumular cantidades significativas de carbono. Solo sobre la base del territorio estudiado, de 290 km^2 , y a la tasa calculada para los 100 años, se podrían secuestrar hasta 5.337 toneladas de carbono al año, las cuales podrían venderse en un mercado de bonos de carbono. Cabe destacar también que en el modelo Century solo se simulan los primeros 20 cm del suelo, ya que estos son los más activos en el ciclo del carbono. Por lo tanto, y dado que el resto del suelo también acumula carbono, la tasa de captura total de carbono es aún mayor.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio indican que existe una estrecha relación entre la presencia de bosque y el secuestro de carbono en el suelo. El potencial de carbono almacenado en un suelo no depende solo de sus propiedades físicas y químicas, sino que también está condicionado por el tipo de vegetación. Para las condiciones evaluadas, se observó un aumento en el contenido de carbono para los suelos con bosque, y una disminución en aquellos con pradera. En ambos casos se alcanzó un equilibrio alrededor de los 50 años, de aproximadamente 11.000 g C/m^2 para los bosques y de 6.000 g C/m^2 para la pradera. Si bien el secuestro de carbono en los suelos tiene un límite, es una opción factible de aplicar en el corto plazo para mitigar el cambio climático.

Además de los beneficios descritos en este estudio, la presencia de carbono en el suelo podría

incrementar la capacidad de retención de nutrientes, reducir la erosión, aumentar el crecimiento del bosque y promover el desarrollo de la biodiversidad. Cuantificar estos beneficios ayudaría a promover aún más la preservación y protección de estas zonas. En futuras investigaciones también se deberían estudiar los impactos, tanto inmediatos como de largo plazo, que tienen sobre el suelo y el ciclo del carbono los incendios, la actividad del hombre y el aumento de CO₂ en la atmósfera.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

El principio fundamental de este trabajo son las ecuaciones de balance de masa. Para calcular la tasa con la que el contenido de carbono cambia en el suelo se usó la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dt} = A - k \cdot C$$

Esta ecuación plantea que el cambio de carbono en el suelo C queda determinado por la tasa neta de entrada de carbono al suelo A , menos la descomposición producida por los microorganismos a una tasa de primer orden k . Para el flujo entre distintos reservorios del suelo tenemos la siguiente relación:

$$\frac{dm_i}{dt} = k_i \cdot f_w \cdot f_t \cdot m_i$$

donde m_i representa la masa de carbono en el reservorio i , k_i es una constante de descomposición para el reservorio, f_w es un factor que depende del contenido de agua y f_t es un factor relacionado con la temperatura.

GLOSARIO

Fotosíntesis: Proceso metabólico de las plantas que convierte materia inorgánica a orgánica con la ayuda de la energía solar. Su importancia radica en el hecho de que remueve carbono del aire y lo fija como materia orgánica.

Materia orgánica: Materia formada por la descomposición de residuos orgánicos de origen animal o vegetal. Su presencia en los terrenos ayuda a la retención de agua y nutrientes.

Reservorio: Depósito donde se puede almacenar gran cantidad de determinado material. En este artículo se usa el concepto del suelo como reservorio, debido a su capacidad de almacenar carbono.

Lábil: Materia poco estable y de rápida degradación.

Humus: Material formado producto de la degradación de la materia orgánica de los árboles, tiende a formar el primer horizonte del suelo.

Lenga: Árbol de la familia de las Nothofagaceae y representativo del bosque andino patagónico. Comúnmente se encuentra en el sur de Argentina y Chile. Puede alcanzar alturas de hasta 30 m y diámetros de 1 m.

Phaeozems: Según la clasificación de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo, los Phaeozems son suelos intensamente lixiviados, con alta saturación de bases y ricos en materia orgánica. Son comunes en tierras planas a onduladas, cubiertas por estepa de pastos altos y/o bosque. Su material parental está conformado por sustancias no consolidadas, predominantemente básicas. Su equivalente según la taxonomía de suelos de Estados Unidos son los Mollisols.

Lúvico: Es un clasificador de suelos de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo que indica que los terrenos poseen un horizonte árgico con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 24 cmol kg⁻¹ o más en todo su espesor, o hasta una profundidad de 50 cm debajo de su límite superior, lo que esté a menor profundidad.

AGRADECIMIENTOS

Los datos de terreno utilizados en esta investigación se generaron a partir del estudio "Evaluación cuantitativa del efecto de la intervención del bosque nativo en la pérdida de suelos en la cuenca del río Serrano, Proyecto #050/2011, Fondo de Investigación del Bosque Nativo de CONAF". La información climática fue facilitada por la Dirección General de Aguas, dependiente del Ministerio de Obras Públicas.

REFERENCIAS

- [1] Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change, *Geoderma* 123, (1-2): 1–22, 2004.
- [2] Lal, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science* 304 (5677): 1623–7, 2004. .
- [3] Parton, W., Stewart, J., Cole, C., Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model, *Biogeochemistry* 5 (1): 109-131, 1988.
- [4] Peng, C., Apps, M., Price, D., Nalder, I., Halliwell, D. Simulating carbon dynamics along the Boreal Forest Transect Case Study (BFTCS) in central Canada: 1. Model testing. *Global Biogeochemical Cycles* 12 (2); 381-392, 1998.
- [5] Cerri, C., Paustian, K., Bernoux, M., Victoria, R., Melillos, J., Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model, *Global Change Biology* 10 (5): 815–832, 2004,.
- [6] Comisión Nacional del Medio Ambiente, Corporación Nacional Forestal. Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe nacional con variables ambientales, 1999.
- [7] IUSS Grupo de trabajo WRB. Base de referencia mundial del recurso suelo. Reporte 103, 2007.
- [8] Dirección General de Aguas, MOP. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Serrano, 2004.
- [9] Dirección General de Aguas, MOP. Balance hídrico de Chile, 1987.
- [10] Thornley, J., Cannell, M., Managing forests for wood yield and carbon storage: a theoretical study, *Tree Physiology* 20 (7); 477-484, 2000.
- [11] Godoy, R., Paulino, L., Oyarzún, C., Boeckx, P., Depositación atmosférica de nitrógeno en el centro y sur de Chile. Un resumen, *Gayana Botanica* 60 (1); 47-53, 2003.
- [12] Uriarte, C., Grosse, H., Los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*). Una orientación para su uso y manejo; recopilación bibliográfica. Informe Técnico 126. CORFO-INFOR, 1991.
- [13] Caldentey, J. Acumulación de biomasa en rodales naturales de *Nothofagus pumilio* en Tierra del Fuego, Chile, *Forest Systems* 4 (2); 1995.
- [14] Oelbermann, M., Voroney, R., Gordon, A., Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104 (3), 359-377, 2004.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Pablo Busch
- 2 Athena Carkovic
- 3 Virginia González
- 4 Profesor Carlos Bonilla





Estudio de propiedades térmicas de sustratos utilizados en cubiertas vegetales

Macarena Mazzachiodi¹, alumna de quinto año

Victoria Sandoval^{1,2}, alumna de magister de primer año

Francisco Suárez¹, profesor asistente

Felipe Victorero³, arquitecto

Carlos Bonilla^{1,2}, profesor asociado

Jorge Gironás^{1,2,4}, profesor asociado

Sergio Vera^{2,3}, profesor asistente

Waldo Bustamante^{2,5}, profesor titular

Victoria Rojas⁶, arquitecto

Pablo Pastén^{1,2}, profesor asociado

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, ESCUELA DE INGENIERÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

²CENTRO DE DESARROLLO URBANO SUSTENTABLE (CEDEUS), FONDAP-CONICYT, CHILE

³DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN, ESCUELA DE INGENIERÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

⁴CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CAMBIO GLOBAL, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

⁵ESCUELA DE ARQUITECTURA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

⁶VR+ARQ, CHILE

INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano sustentable ha promovido diversas soluciones tecnológicas que minimizan los impactos adversos de una ciudad. Las **cubiertas vegetales** son estructuras con múltiples capas constructivas que permiten incorporar vegetación a las construcciones (Figura 1), y que han captado la atención de nuestra sociedad debido a que entregan grandes y variados beneficios de manera simultánea. Por ejemplo, permiten remover contaminantes, atenuar ruidos, incrementar la biodiversidad, reducir la escorrentía y mejorar el aislamiento térmico de estructuras, además de proporcionar ambientes más placenteros en el contexto urbano [1].

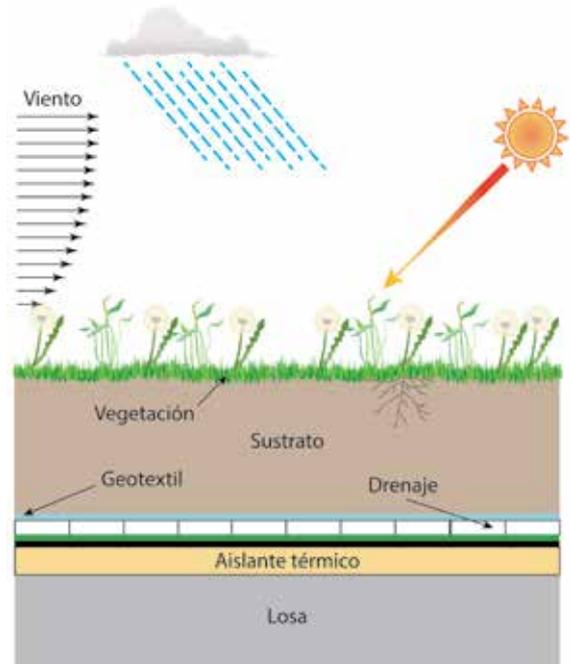


Figura 1. Esquema de las capas constructivas de una cubierta vegetal y de los flujos de agua y de calor que ocurren en ella.

Para que una cubierta vegetal entregue los beneficios anteriormente señalados se debe diseñar correctamente cada una de sus capas constructivas. El **sustrato** es una de las capas de mayor interés porque entrega a la vegetación los recursos necesarios para su sobrevivencia: nutrientes, agua y un medio en el cual crecer [2]. La resistencia térmica del sustrato controla las temperaturas a las cuales están sometidas las raíces de las plantas, un factor vital para la subsistencia de la vegetación [2]. Por otro lado, los sustratos también tienen un rol importante en los flujos de agua y calor en la cubierta, influyendo en su eficiencia térmica y generalmente reduciendo los costos de climatización [3-5].

A pesar de su relevancia, los sustratos comúnmente disponibles en el mercado no cuentan con una caracterización que permita comprender los principales procesos físicos que ocurren en ellos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar las propiedades térmicas de distintos sustratos comúnmente utilizados en cubiertas vegetales chilenas. Esta caracterización es el primer paso para generar herramientas de modelación que permitan predecir el comportamiento de las cubiertas vegetales y apoyen el diseño de estas soluciones tecnológicas.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron sustratos comúnmente empleados en cubiertas vegetales y luego se procedió a medir sus propiedades con sensores especializados. Los sustratos elegidos son los siguientes (Figura 2):

- LIVE: sustrato similar a un suelo franco arenoso [6] y usado en el proyecto Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios (LIVE UC).
- Perlita: sustrato que contiene tierra de hojas y perlita, un mineral volcánico.
- Tierra de hoja: sustrato formado a partir de residuos vegetales.
- Ladrillo: sustrato que contiene ladrillo molido, compuesto principalmente por arcilla [7].



Figura 2. Sustratos analizados. De izquierda a derecha: LIVE, perlita, tierra de hoja y ladrillo.

Las propiedades térmicas de un sustrato permiten predecir la propagación de los flujos de calor que ocurren en la superficie de las cubiertas vegetales (**radiación, calor sensible y calor latente**). Este flujo de calor viaja a través del sustrato principalmente por **conducción de calor** y depende del **contenido de humedad** (θ) del medio [8]. La **conductividad térmica** $\lambda(\theta)$, la **capacidad calorífica volumétrica** $C(\theta)$ y la **difusividad térmica** $D(\theta)$ (la razón entre $\lambda(\theta)$ y $C(\theta)$), son las propiedades que se necesitan para resolver la **conservación del flujo de calor** [7]:

$$(1) \quad C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right]$$

donde se asume flujo en la dirección vertical (z) y T es temperatura. En la Ecuación 1 se ha despreciado el efecto de la **advección** dentro del sustrato.

Se desarrolló un protocolo experimental que permitió determinar las propiedades térmicas en función de la humedad de los distintos sustratos. Se incrementó el θ de las muestras agregando una cantidad conocida de agua y se esperó hasta que el agua estuviese distribuida de manera uniforme en el recipiente. Una vez alcanzado este estado de equilibrio, se volvieron a medir las propiedades térmicas y el nuevo θ . Este procedimiento se repitió hasta alcanzar la **humedad de saturación** (θ_{sat}).

La humedad se midió con un sensor **TDR** [10], mientras que las propiedades de los sustratos, con una sonda de doble aguja. Esta última se conectó a un analizador de propiedades térmicas [9], el cual mide $C(\theta)$ y $D(\theta)$ y, en base a estas, se obtuvo $\lambda(\theta)$ (ver principio científico). Los puntos experimentales de $\lambda(\theta)$ fueron utilizados para encontrar una curva de conductividad térmica, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$(2) \quad \lambda(\theta) = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{0,5}$$

donde b_1 , b_2 y b_3 son parámetros que se obtienen mediante la técnica de los **mínimos cuadrados** [11].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la conductividad térmica normalizada, $\lambda_N = \lambda(\theta)/\lambda_{dry}$, en función del nivel de saturación, $S_r = \theta / \theta_{sat}$, para el sustrato LIVE y para un suelo orgánico. En este caso λ_{dry} es la **conductividad térmica del sustrato seco**. La curva del sustrato LIVE se asemeja a una curva de suelo natural. Al aumentar la humedad del sustrato LIVE, la conductividad aumenta de cinco a seis veces su valor inicial, en cambio, para un suelo orgánico, esta aumenta siete veces. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura [2], donde la conductividad varía de manera importante debido a cambios en la humedad del medio [7]. Por otro lado, los valores máximos de conductividad siguen el siguiente orden [2]: arena (2,07 W/m-°C) > limo (1,22 W/m-°C) > arcilla (1,09 W/m-°C) > sustrato orgánico (0,49 W/m-°C). Respecto del sustrato LIVE, el valor obtenido es de 0,79 W/m-°C, que es un valor intermedio entre limos y suelos orgánicos. Esto es esperable debido a que el sustrato LIVE contiene grandes cantidades de limo y de materia orgánica. Por ende se puede deducir que el desempeño térmico y constructivo del sustrato LIVE es mejor que el de un suelo natural: al tener una conductividad térmica baja, el flujo de calor es menor, logrando un mejor aislamiento térmico. Por otro lado, la **densidad aparente** del sustrato LIVE es menor que la de suelos naturales [12]. Esto le da una ventaja constructiva a este último debido a que, al ser más liviano, las estructuras que soportan a una cubierta vegetal estarán sometidas a sollicitaciones menores.

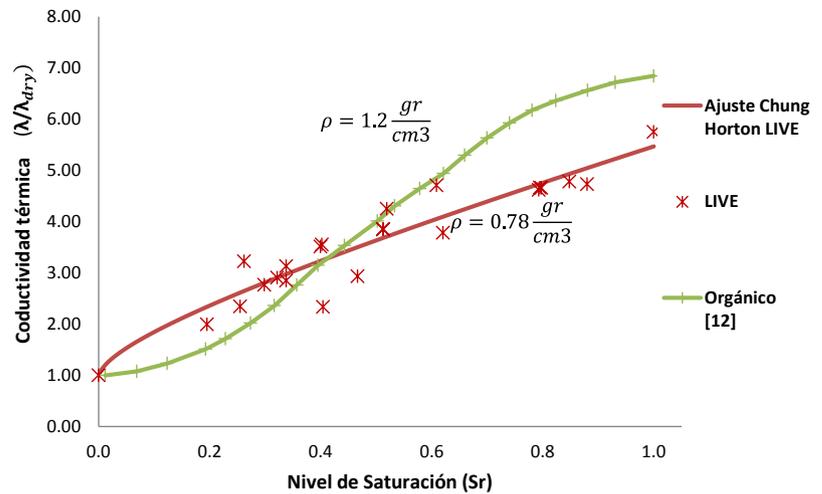


Figura 3. Comparación del sustrato LIVE con un sustrato abundante en materia orgánica y de mayor densidad aparente [12].

Las curvas de conductividad térmica para las distintas muestras ensayadas se presentan en la Figura 4. El sustrato LIVE es el que posee los mayores valores de conductividad térmica, y su ajuste con el modelo de Chung y Horton [11] tiene un coeficiente de determinación (r^2) de 88,9%. El ajuste de este modelo a los otros sustratos tiene siempre un r^2 mayor que un 94,3%. Además, los valores de conductividad están en el mismo orden de magnitud que otros sustratos utilizados en cubiertas vegetales [5]. Dado que los sustratos tierra de hoja y ladrillo tienen las menores conductividades, son los mejores sustratos para aislar térmicamente una cubierta vegetal.

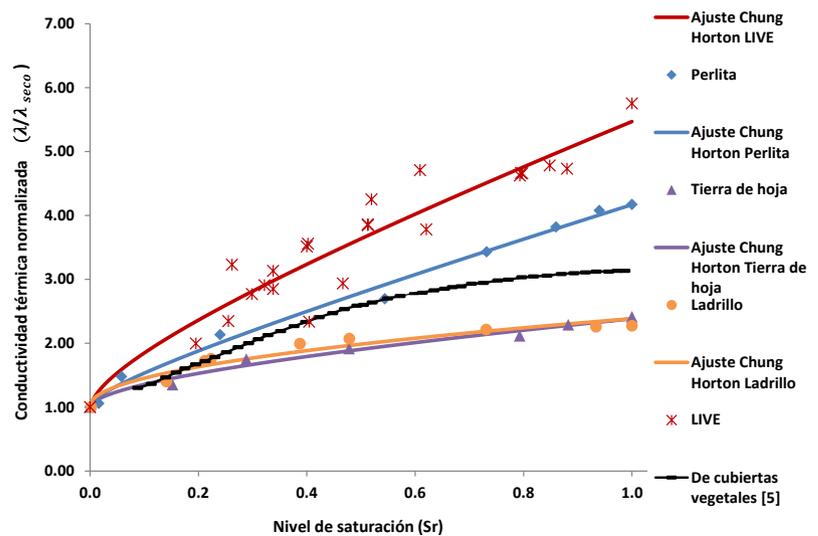


Figura 4. Ajuste del modelo de Chung y Horton [11] a los sustratos analizados y comparación con sustratos típicos de cubiertas vegetales [5].

La capacidad calórica medida experimentalmente concuerda con valores de referencia obtenidos en otros estudios [2]. La Figura 5 muestra que los sustratos LIVE y ladrillo son los que poseen valores más altos de capacidad calórica, asemejándose al comportamiento de un suelo arenoso. A mayor capacidad calórica, más cantidad de calor se necesita para aumentar la temperatura de la cubierta; por lo tanto, se aísla mejor el sistema. Por otro lado, la tierra de hoja tiene un comportamiento distinto: para humedades bajo $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ se comporta como un sustrato arenoso, pero para valores superiores a $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, su comportamiento se asemeja a uno orgánico.

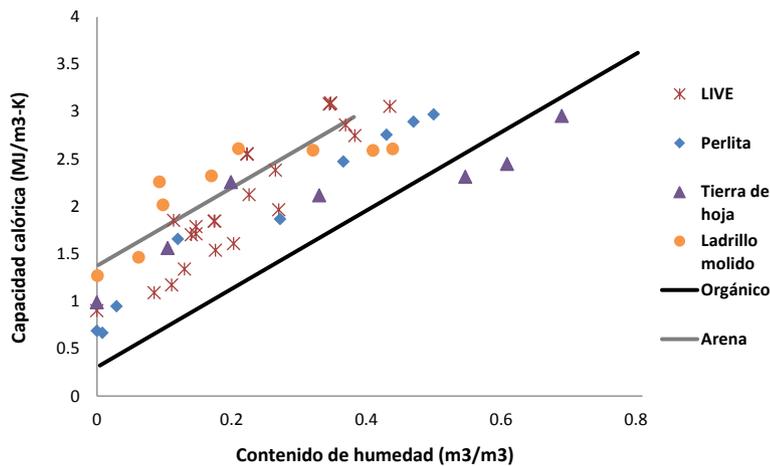


Figura 5. Curvas de capacidad calórica. Puntos: datos experimentales (LIVE, perlita, tierra de hoja y ladrillo). Líneas continuas: valores de referencia para suelos orgánicos y arenas [2].

Las curvas de difusividad térmica obtenidas experimentalmente se presentan en la Figura 6. La difusividad de los sustratos está en el mismo orden de magnitud que la de otros suelos [2], teniendo un valor menor que la de suelos arenosos o limosos, y levemente mayor que la de suelos orgánicos. Además, los sustratos ensayados muestran un valor relativamente constante para distintos niveles de humedad. El sustrato LIVE presenta una difusividad media de $2,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ y una variabilidad mayor que la de los otros sustratos. El comportamiento de la perlita se asemeja bastante al de un suelo orgánico, al igual que la tierra de hoja. El ladrillo, en tanto, tiene una difusividad levemente mayor a bajas humedades, al igual que lo que ocurre en suelos arenosos o limosos [3]. En general, se puede concluir que los sustratos presentan una difusividad térmica menor que la de suelos típicos. Esto significa que se demorarán más tiempo que los suelos naturales en alcanzar equilibrio térmico, sugiriendo que los flujos de calor en los sustratos viajarán más lentamente que en suelos. Estos resultados demuestran que en cubiertas vegetales es más beneficioso utilizar sustratos en vez de suelos naturales.

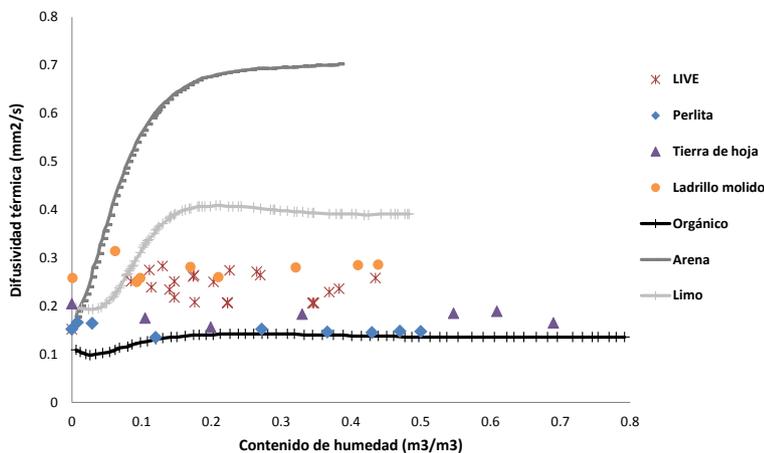


Figura 6. Curvas de difusividad térmica. Puntos: datos experimentales (LIVE, perlita, tierra de hoja y ladrillo). Líneas continuas: valores de referencia para sustratos orgánicos, limo y arena [2].

CONCLUSIONES

En base a los resultados de las propiedades térmicas se deduce que la elección del sustrato puede reducir el flujo de calor conductivo en una cubierta vegetal de manera considerable. Como se observa con el ladrillo, su baja conductividad térmica y alta capacidad calórica volumétrica sugieren que se puede evitar la pérdida de calor de una habitación bajo una cubierta vegetal con este tipo de sustrato. La tierra de hoja tiene un comportamiento similar, pero además presenta alta variabilidad en los valores de capacidad calórica volumétrica, por lo tanto, no se recomienda para este tipo de sistemas. Por otro lado, el sustrato LIVE presenta aumentos muy drásticos en su conductividad térmica.

Además, los valores de difusividad térmica de los sustratos sugieren que estos son más adecuados para cubiertas vegetales que suelos naturales. Fundado en el análisis, se concluye que el ladrillo tiene un comportamiento térmico superior a los demás sustratos estudiados. Sin embargo, se debe recalcar que el flujo de calor también se ve fuertemente influenciado por la vegetación, la cual no ha sido estudiada en esta investigación. Los resultados obtenidos son una primera aproximación para poder diseñar una cubierta vegetal de manera óptima en Chile.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Las propiedades térmicas de los sustratos se determinaron con una sonda de doble aguja SH-1 conectada a un analizador de propiedades térmicas [9]. La sonda SH-1 se inserta en un medio poroso con una determinada humedad (θ) y luego aplica un pulso de calor en una de sus agujas, mientras que en la otra se monitorea la variación temporal de la temperatura. Esta información es utilizada para encontrar simultáneamente $D(\theta)$ y $C(\theta)$ mediante la resolución de la ecuación de conducción radial de calor [13]. Una vez conocidos $D(\theta)$ y $C(\theta)$, $\lambda(\theta)$ se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda(\theta) = D(\theta) C(\theta)$$

Para medir el θ se utilizó un sensor TDR [10]. Este instrumento utiliza la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio poroso para obtener su humedad. A mayor tiempo de viaje de la onda, mayor es el contenido de humedad del medio [14].

GLOSARIO

Cubierta vegetal: Tipo de techumbre que está parcial o totalmente cubierta por vegetación. Se compone de un sustrato artificial y otras capas que dependen del objetivo tecnológico de la cubierta (Figura 1). Se diseñan principalmente para minimizar los impactos de la urbanización.

Sustrato: Medio artificial de crecimiento y vida de plantas o animales.

LIVE: Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios; Proyecto apoyado por INNOVA-CORFO 12IDL2-13630. Este se encuentra en el campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Radiación: Emisión de energía de un cuerpo en forma de ondas electromagnéticas.

Calor latente: Energía liberada o recibida por una sustancia cuando cambia su estado. En cubiertas vegetales el calor latente está asociado a la energía requerida para que el agua en el sustrato se evapore. Este componente del flujo de calor ocurre bajo condiciones isotérmicas.

Calor sensible: Energía en forma de calor que recibe un cuerpo que hace que aumente su temperatura sin cambiar de estado.

Calor por conducción: Propagación de calor en un cuerpo por movimiento interno molecular. La existencia de diferencias de temperatura causa la transferencia de energía cinética entre zonas de mayor a menor temperatura [8].

Contenido de humedad: Es la proporción de volumen de agua contenida en una porción de sustrato seco.

Humedad de saturación: Máximo volumen de agua contenido en una porción de sustrato seco.

TDR: Sensor que utiliza la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio poroso para obtener su humedad. *Time Domain Reflectometry* es el nombre de la técnica.

Conductividad térmica: Cantidad de calor que se transfiere en una unidad específica de volumen y bajo un gradiente unitario de temperatura. Su valor depende de la composición mineralógica o materia orgánica el sustrato, como también de la fracción volumétrica de agua o aire [8]

Capacidad calórica volumétrica: Calor necesario para aumentar en un grado la temperatura de un volumen unitario de un sustrato [7].

Conservación del flujo de calor: Ecuación que describe el flujo de calor en una unidad de sustrato de referencia. Incluye fenómenos como conducción, advección, expansión térmica o fuentes de calor.

Advección: Transferencia de calor debido al movimiento de un fluido.

Difusividad térmica: Razón entre conductividad térmica y capacidad específica volumétrica [7]. Es una medida de habilidad de un material para conducir energía térmica en relación a su capacidad de almacenarla

Conductividad térmica de un sustrato seco: Conductividad térmica de un sustrato cuando éste tiene un contenido de humedad mínimo.

Densidad aparente: Relación entre el peso de sustrato y el volumen que ocupa.

Mínimos cuadrados: Ajuste de curvas empírica y teórica a través de la minimización de la diferencia entre estas.

AGRADECIMIENTOS

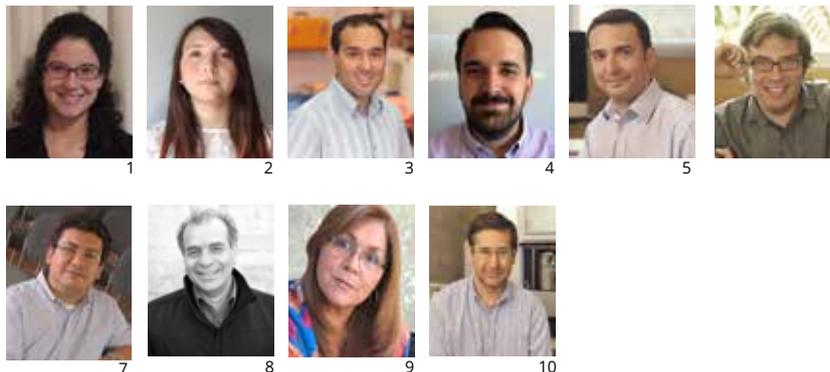
Los autores desean agradecer al señor Camilo Pinto por el apoyo técnico en la medición de las propiedades térmicas. Además, se agradece al proyecto INNOVA-CORFO 12IDL2-13630: “Soluciones integrales de cubiertas vegetales sustentables para edificios comerciales-industriales en climas semiáridos de Chile”, por la posibilidad de colaborar en su proyecto y por facilitar el sustrato analizado; al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS - CONICYT/FONDAP/15110020) por apoyo de laboratorio y por colaborar con beca de investigación para la señorita Victoria Sandoval; y a los proyectos Fondecyt N°1130522: “Impact of salinity and groundwater fluctuations on moisture distribution and non-isothermal water fluxes in soils of arid zones” y Fondecyt N°1131131: “Experimental study of hydrological processes in Chilean urban areas at a residential/lot scale”, que facilitaron la instrumentación para realizar la caracterización térmica de los sustratos.

REFERENCIAS

- [1] Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C. H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., Sulaiman, M. Y. A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23: 155-168, 2013.
- [2] Campbell, G. S. y Norman J. M., An introduction to environmental biophysics. New York, Springer-Verlag: 1–144, 1998.
- [3] Fang, C.F Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. *Energy Build.*40 (6): 1048–1052, 2008.
- [4] Pompeii II, W. C., Hawkins, T. W. Assessing the impact of green roofs on urban heat island mitigation : a hardware scale modeling approach . *The Geographical Bulletin* 52(1): 52–61, 2011.
- [5] Sailor, D., Hagos, M. An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. *Energy and Buildings*, 43(9): 2298–2303, 2011.
- [6] Klute, A. Methods of soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods. Agronomy Series 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1994.
- [7] Horton, R., Jury, W. A. Soil physics. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc: 5-199, 2004.
- [8] Hillel, D., Introduction to soil physics. Amherst, Academic P. University of Massachusetts: 155–170, 1982.
- [9] Decagon Devices, Inc. KD2 Pro thermal properties analyzer: operator’s manual. Decagon Devices, Inc. Pullman WA 99163:1-63.
- [10] Decagon Devices, Inc. GS3: Water content, EC and temperature sensors: operator’s manual. Decagon Devices, Inc. Pullman WA 99163: 1-23.
- [11] Chung, S. O., Horton, R., Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resources Research* 23 (12): 2175-2186, 1987.
- [12] Van Rooyen, M., Winterkorn, H.F Structural and textural influences on the thermal conductivity in soils. *Highway Res. Bd. Proc.* 38: 576-621, 1959.
- [13] Bristow, K. L., Campbell, G. S., Calissendorff, C. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Science Society of America Journal* 57: 930-934, 1993.
- [14] Erik, B. Winter soil moisture regime monitored by the time domain reflectometry technique (TDR). *Geogr. Ann* 68 (3): 175-184, 1986.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Macarena Mazzachiodi
- 2 Victoria Sandoval
- 3 Profesor Francisco Suárez
- 4 Felipe Victorero
- 5 Profesor Carlos Bonilla
- 6 Profesor Jorge Gironás
- 7 Profesor Sergio Vera
- 8 Profesor Waldo Bustamante
- 9 Victoria Rojas
- 10 Profesor Pablo Pastén





Determinación de una política de mantenimiento oportunista: análisis en flota de camiones mineros*

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Diego Carrasco¹, alumno de sexto año

Rodrigo Pascual¹, profesor asociado

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

INTRODUCCIÓN

Los costos de mantenimiento de equipos conforman entre un 15% y un 70% del total de los costos de un proceso productivo [1]. En el caso de la minería, esa componente oscila entre 20% y 35% [2]. Actualmente, la minería aporta un 14,2% del PIB de Chile [3], por lo que una correcta política de mantenimiento tiene un alto potencial para impactar el desempeño del negocio minero y la producción nacional.

Existen distintas formas de minimizar los costos de mantenimiento, para esto existen distintas políticas para enfrentar el problema. De acuerdo a [1] las políticas de mantenimiento se pueden catalogar en cinco tipos: (i) **mantenimiento correctivo** (MC); (ii) **mantenimiento preventivo** (MP); (iii) **mantenimiento oportunista** (MO); (iv) **mantenimiento basado en condición**; y (v) **mantenimiento predictivo**. Estas se dividen, al mismo tiempo, en dos clases: las que toman datos de la condición del equipo y las que se basan en el tiempo de uso del equipo.

*Este trabajo corresponde a una versión de desarrollo de un artículo presentado en Mantemin 2014.

En el presente artículo se busca una metodología novedosa y de fácil uso para optimizar la política de mantenimiento. Partiendo de la base de que los modelos que se sustentan en el tiempo de uso son de mayor accesibilidad a los mantenedores, dado que no requieren la utilización de dispositivos extras de medición, en este estudio se optó por esa línea de política de mantenimiento.

Para poder realizar un análisis sobre las políticas se requiere que los equipos se deterioren en el tiempo. Wang [4] presenta una revisión de los modelos más importantes que han sido la piedra angular y que se han empleado durante la última década en el área.

Dado que no es adecuado aislar los diferentes componentes, se optó por una política de mantenimiento multicomponente, la que se puede optimizar de diversas maneras [5], entre las que destaca el mantenimiento oportunista (MO) [6]. Para optimizar una política de MO se han planteado diferentes alternativas, una de las cuales es mediante los modelos markovianos [7], que se explora en este artículo.

METODOLOGÍA

Para resolver el modelo de política oportunista óptima, se considera un criterio de costo marginal que es en el que se incurre por las actividades de mantenimiento de los componentes analizados [8]. La idea detrás de esto es solamente modelar una parte del problema de interés, dando simpleza al modelo. La función objetivo del modelo corresponde a la minimización de los costos marginales, que es un problema de minimización equivalente a lo que sería la minimización de los costos generales, considerando que solamente varían debido a la parte de los costos generales compuesta por lo analizado en la FO. Dado que se tomaron en cuenta sistemas en serie, existe dependencia económica entre los componentes.

Los costos considerados por actividad de mantenimiento son fijos y se calculan en función del costo de detención del equipo por unidad de tiempo y el costo de taller. Estos costos conforman una función lineal que es la misma para todas las intervenciones (Ecuación 1), ya que depende del sistema a analizar y no del componente; a su vez, el tiempo de intervención sí depende del componente. La parte de los costos variables por componente consiste en repuestos e insumos que dependen de la actividad realizada por cada elemento específico. Ambos fluctúan en caso de tratarse de un MP o MC, ya que cambian los tiempos, urgencia, y disponibilidad de repuestos y/o insumos.

$$(1) \quad C_{\text{fijo}} = C_{\text{Transporte}} + C_{\text{Detención}} \times t$$

Para cada componente se obtienen **funciones de confiabilidad** ($R(t)$). Dichas funciones sirven para calcular las probabilidades de falla de cada elemento a través del tiempo. Cabe destacar que existe una dependencia temporal entre los componentes, ya que operan simultáneamente, luego se considera que la misma escala de tiempo afecta de manera análoga a las funciones de confiabilidad por componente.

Para poder definir un horizonte de tiempo se fijó una política de MP por cada componente separado, resultado en un tiempo entre MP (T_i). Estos tiempos se obtienen minimizando los costos marginales esperados del mantenimiento de dichos equipos (Ecuación 2). Antes de llegar a T_i puede fallar, con probabilidad igual al complemento para llegar a 100% de la confiabilidad en T_i , incurriendo en actividad de MC, o si es conveniente puede tener un MO en el caso multicomponente. Esta conveniencia será determinada por una variable a optimizar. Se define un tiempo medio entre intervenciones (MTBI, por su acrónimo en inglés *Mean Time Before Intervention*) (Ecuación 3) y la no negatividad de la variable (Ecuación 4).

$$(2) \quad \text{Min}_x \left\{ \frac{R(T_i) \times C_{MP} + [1 - R(T_i)] \times C_{MC}}{MTBI(T_i)} \right\}$$

$$(3) \quad MTBI(T_i) = T_i \times R(T_i) + [1 - R(T_i)] \times \int_0^{T_i} R(t) dt$$

$$(4) \quad T_i \geq 0$$

donde C_{MP} y C_{MC} son los costos de un MP y un MC respectivamente.

Una vez obtenidos los tiempos se debe discretizar el horizonte T_i de cada componente, en $T_i/\Delta t$ intervalos, donde el largo de cada intervalo es Δt . Considerando que cada estado de la cadena markoviana debe ser capaz de contener toda la información del sistema [9], la cantidad de posibles estados está dada por:

$$(5) \quad n = \prod_i \frac{T_i}{\Delta t}$$

Los posibles eventos se definen como la falla de algunos componentes (subconjunto f), representando un MC cada uno de ellos (Ecuación 6). Aquí estos pueden cumplir su T_i , puede envejecer el sistema (Ecuación 7), o puede incurrirse en un MO.

$$(6) \quad P(\text{falla } j) = \prod_i \int_0^{t+\Delta t} [1 - R_i(x)] dx \prod_{i \neq j} \int_0^{t+\Delta t} R_i(x) dx$$

$$(7) \quad P(\text{envejecer}) = \prod_i \int_0^{t+\Delta t} R_i(x) dx$$

En caso de MP, los eventos ocurren cuando se alcanza el umbral T_i , luego si se cumple la ecuación 8 se realiza un MP. Una MO ocurre si se cumple la condición de la Ecuación 9, además debe haber un MC o MP, donde α_i corresponde a la fracción del umbral frente al cual conviene realizar un MO. Estas son las variables de decisión del modelo:

$$(8) \quad t + \Delta t \geq T_i$$

$$(9) \quad t + \Delta t \geq T_i \alpha_i$$

Todas las posibles transiciones están dadas en la matriz de transiciones M , definida en la Ecuación 10:

$$(10) \quad \mathbf{M} = \mathbf{M}_{MO} + \mathbf{M}_{MP} + \mathbf{M}_{MC} + \mathbf{M}_{ENVEJECIMIENTO}$$

La probabilidad de encontrarse en un estado cualquiera en el largo plazo, π , se define de acuerdo a la ecuación 11 [9]:

$$(11) \quad \boldsymbol{\pi} = \mathbf{M}\boldsymbol{\pi}$$

Finalmente el modelo se define como:

$$(12) \quad \text{Min}_{\alpha} \mathbf{c}_{MO}^T \mathbf{M}_{MO} \boldsymbol{\pi} + \mathbf{c}_{MP}^T \mathbf{M}_{MP} \boldsymbol{\pi} + \mathbf{c}_{MC}^T \mathbf{M}_{MC} \boldsymbol{\pi}$$

s.a. $\boldsymbol{\pi} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\alpha})\boldsymbol{\pi}$

El modelo se resuelve iterando y variando α , que cambia el factor M .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la validación del modelo se analizó una flota que consta de 30 camiones con capacidad sobre las 300 toneladas, que operan en una mina ubicada en Chile. Los camiones estudiados son propulsados por motores eléctricos, para lo cual cuentan con un módulo de potencia que entrega energía eléctrica a partir de la combustión de petróleo. Este módulo de potencia se conforma de un radiador, un alternador y un motor diésel. El radiador sirve para disipar el exceso de calor y el motor diésel para convertir el petróleo en energía mecánica, que es aprovechada por el alternador para generar la energía eléctrica que alimenta a los motores de tracción.

En el caso de camiones en minería, la relación de costos entre MP y MC es dos a tres en las condiciones operacionales de la flota [10].

Para el modelo luego se determinaron dos variables α_1 para el alternador y α_2 para el motor diésel, que conforman el vector α .

Las funciones de confiabilidad se modelaron vía distribución **Weibull**. Los eventos posibles se definen como: (i) probabilidad de que falle solo el componente 1; (ii) probabilidad de que falle solo el componente 2; (iii) probabilidad de que fallen ambos componentes; (iv) probabilidad de que ambos componentes envejeczan. Cada uno de los escenarios se divide en MC, MP, MO y envejecimiento. Éstos determinan M .

En la Figura 1 se observa cómo varían los costos marginales a partir de la metodología propuesta, considerando la variación de ambos umbrales de oportunidad, definiendo el caso base como α nulo. Los umbrales de oportunidad óptimo son 50% de T_1 y 60% de T_2 ($\alpha_1=0.5$ y $\alpha_2=0.6$).

El análisis se realizó tomando en cuenta una unidad de tiempo (ut) equivalente a un año. La unidad

monetaria (um) no se expresa por motivos de confidencialidad.

Se observa una disminución de dos unidades monetarias por unidad de tiempo de operación por camión (Figura 1). Asimismo, se aprecia un aumento de la disponibilidad de la flota a medida que aumentan los factores de oportunidad (Figura 2). Esto se debe a que el número de intervenciones incrementa el número absoluto de intervenciones.

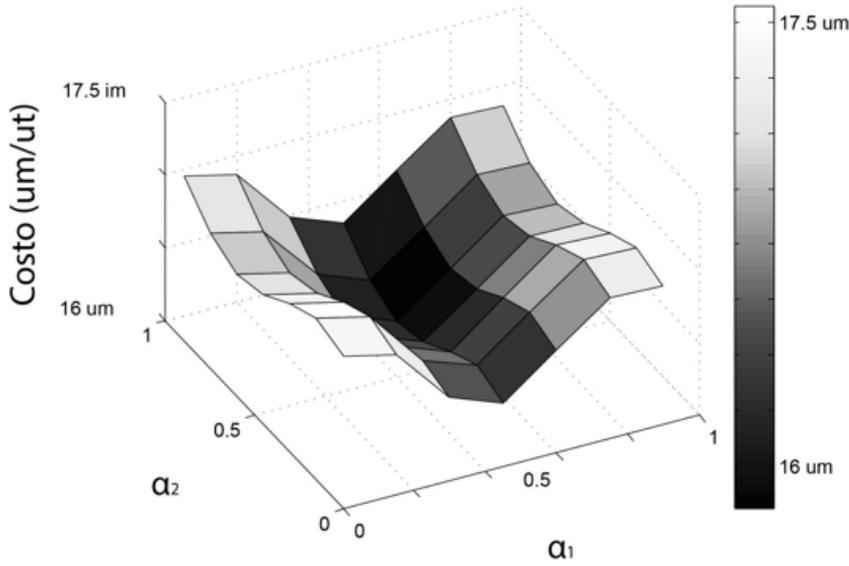


Figura 1. Análisis de α para caso de estudio.

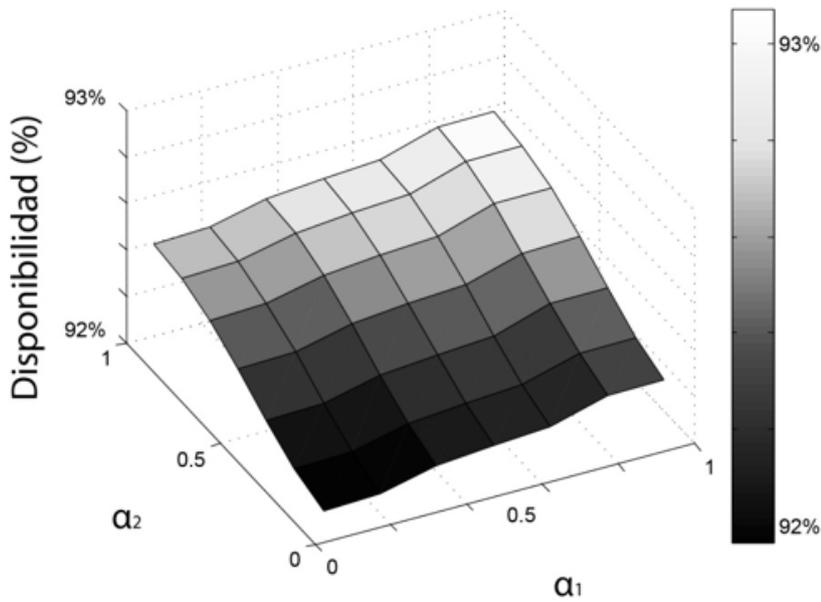


Figura 2. Análisis de disponibilidad.

CONCLUSIONES

A diferencia de soluciones propuestas actualmente, esta herramienta es fácil de plantear, pues no presenta dificultades frente a análisis de problemas que incluyan pocos componentes. El tiempo de elaboración del problema y de resolución crece exponencialmente, por lo que no serviría para casos en los que se quiere realizar un análisis en detalle de todo un sistema. En los otros casos, en que se estudia una parte del sistema o se agrupan subsistemas, el problema se puede resolver entregando disminuciones reales en costos.

Se observa que existe un *trade-off* entre la continuidad de la solución y el tiempo y facilidad de resolución, en la medida en que varía el tamaño de Δt . Esto se debe a que el número de estados posibles del modelo crece exponencialmente con la cantidad de componentes estudiados y con el grado de continuidad que se le da a la discretización del tiempo (ecuación 5). El diseño permite variaciones tan pequeñas en α como Δt lo permita. Por otro lado, si los cambios son muy pequeños, el tiempo de resolución aumenta exponencialmente el costo de resolución del problema, dado que se emplea un método iterativo.

Se observa a partir de la Ecuación 1 que si aumenta mucho el precio del cobre, el costo de detención del equipo crece, lo que hace que suba el costo de realizar mantenimientos. Si llegara a ser lo suficientemente grande, el objetivo sería disminuir el número de intervenciones, con lo que solución sería siempre realizar MO, ya que la Figura 1 tomaría la forma de Figura 2.

En el caso estudiado se observa una disminución de 2,6 millones de dólares por año, lo cual representa un ahorro real en la operación en caso de aplicarse la metodología.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

El costo de realizar una reparación es más alto que el de efectuar una mantención preventiva. Por tanto, en sistemas que se deterioran con el paso del tiempo es útil prevenir las fallas y mantener preventivamente.

Para realizar la modelación de la probabilidad de fallas se recurre a una función de confiabilidad. Con esta se puede definir un intervalo óptimo entre MP, el que si es muy pequeño, el equipo está sobremantenido, incurriendo en costos innecesarios; en cambio, si es muy grande, las intervenciones serán mayoritariamente MC. Esto se ve gráficamente en la Figura 3.

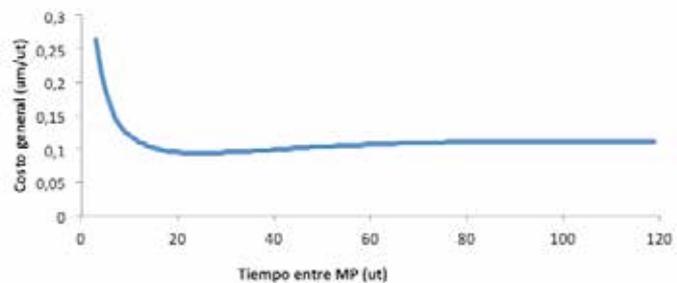


Figura 3. Costo general por unidad de tiempo en función de política de MP.

Este análisis no contempla interacciones entre componentes de un sistema, ya que si se detiene el costo de realizar una intervención preventiva será distinto por el aprovechamiento de economías de escalas, generadas por la ausencia de costo-oportunidad y costos de preparación para la intervención. Es por esto que se plantean políticas de MO, que presentan mejoras contra la optimización aislada de políticas de mantenimiento por componente.

GLOSARIO

PIB: Producto Interno Bruto, medida de la producción de un país en términos monetarios.

Mantenimiento correctivo: Estrategia de mantenimiento que solamente realiza actividades frente a falla.

Mantenimiento preventivo: Estrategia que consiste en actividades de mantenimiento periódicas, estableciendo estas de acuerdo a parámetros de confiabilidad.

Mantenimiento oportunista: Política en que se agrupan actividades de mantenimiento. Solamente se puede hacer en sistemas multicomponentes. Consiste en realizar más de una actividad preventiva o correctiva, que se caracteriza como secundaria, aprovechando una intervención primaria. La intervención primaria corresponde, generalmente, a un MP, MO o una inspección del estado del sistema o equipo.

Mantenimiento basado en condición: Estrategia en que las actividades de mantenimiento se realizan en función de deterioros de la condición del equipo. Es necesario monitorear el estado de las maquinarias continua o periódicamente.

Mantenimiento predictivo: Al igual que en el mantenimiento basado en condición se requiere recolección de información acerca de la situación de la máquina. A partir de esta se determinan patrones anómalos que sirvan de indicador de que ocurrirá una falla, antes de la cual se hace mantención al equipo.

Función confiabilidad: Función matemática que define la probabilidad de supervivencia de un elemento desde el instante cero hasta el cual en que se evalúa la función.

Weibull: Modelo matemático utilizado frecuentemente para definir funciones de confiabilidad. Sus parámetros son dos, uno de forma y una vida característica. El primero define la naturaleza de las fallas, que pueden ser infantiles, aleatorias o de vejez, las primeras ocurren dentro del primer tramo de vida del elemento, y las últimas ocurren con mayor frecuencia a medida que el elemento envejece. La vida característica se define como la esperanza de supervivencia del 37% de los elementos.

MTBI: Tiempo medio entre intervenciones, por su sigla en inglés *Mean Time Before Intervention*. Se define como el tiempo promedio que transcurre entre intervenciones, que pueden ser preventivas o correctivas.

REFERENCIAS

- [1] Bevilacqua, M., Braglia, M., The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection, *Reliability Engineering & System Safety* 70(1); 71-83, 2000.
- [2] Dhillon, B. S., Mining equipment reliability, maintainability, and safety. Springer, 2008, ISBN 1848002882.
- [3] Sociedad de Fomento Fabril (SOFOFA). La industria chilena en cifras [en línea], 2012, disponible en web: <http://web.sofofa.cl/informacion-economica/indicadores-economicos/estructura-de-la-industria/>
- [4] Wang, H., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research* 139(3); 469-489, 2002.
- [5] Nowakowski, T., Werbinka, S. On problems of multicomponent system maintenance modelling, *International Journal of Automation and Computing* 6 (4); 364-378, 2009.
- [6] Ab-samat, H., Kamaruddin, S, Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches: A review, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 20(2); 98-112, 2014.
- [7] Laggoune, R., Chateaneuf, A., Aissani, D. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers & Chemical Engineering* 33(9); 1499-1510, 2009.
- [8] Smidt-Destombes, K. S., Van Der Heijden M. C., Van Harten, A. Joint optimisation of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for k-out-of-N systems. *International Journal of Production Economics* 118(1); 260-268, 2009.
- [9] Pinsky, M., Karlin, S. An introduction to stochastic modeling (4a. edición), Elsevier Academic Press. Oxford, 2010, ISBN 0123814170.
- [10] Knights, P.F, Louit, D.; Lay, A. Determining return on investment of maintenance projects using statistical cost modeling, *Mining Engineering* 56(8); 33-47, 2004.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Diego Carrasco

2 Profesor Rodrigo Pascual



1



2



Diseño de horno de fundición de cobre

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Rino Guajardo¹, alumno de sexto año

Matías Zamorano¹, alumno de sexto año

Álvaro Videla¹, profesor asistente

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

INTRODUCCIÓN

La minería constituye una de las actividades más significativas para Chile. El procesamiento del mineral de cobre tiene muchas etapas, donde se obtiene como resultado cobre con un 99,99% de pureza. En la Figura 1 se pueden ver las etapas generales de este proceso. Actualmente las compañías que se dedican a este rubro en el país comercializan el cobre de dos formas, en **cátodos** electrolíticos y **concentrado de cobre**, donde este último es fundido generalmente fuera del país. Dentro de los procesos mineros, la fundición recibe el concentrado con un contenido de aproximadamente 30% de cobre y lo somete a procesos **pirometalúrgicos**, mediante los cuales el cobre es enriquecido para finalmente formar cobre metálico [1]. Este proceso requiere de mucha energía calorífica para generar reacciones a altas temperaturas.



EXTRACCIÓN

CHANCADO Y
MOLIENDA

FLOTACIÓN

FUNDICIÓN Y
REFINACIÓN

CÁTODO

Figura 1. Etapas del procesamiento del mineral de cobre.

En Chile existen cinco fundiciones que obtienen cátodos de alta pureza. Sin embargo, el 80% de la capacidad de fusión del mundo se encuentra en Asia, siendo China y Japón los líderes, lo que se atribuye a sus bajos costos energéticos en este proceso [2]. Frente a esto, debe existir un desarrollo tecnológico en la industria para promover eficiencias que permitan el desarrollo tecnológico en el país. Esta investigación desarrolla un acercamiento inicial a la optimización del diseño de un horno.

El proyecto busca diseñar, fabricar y testear un horno económico, no continuo, seguro y de pequeña escala que alcance la temperatura de fusión del cobre (1250°C) y que permita llegar a la producción de metal blanco (fase sólida de $\sim 65\%$ Cu), controlando variables como energía aplicada durante el proceso y temperatura alcanzada en el horno.

METODOLOGÍA

La metodología de diseño del horno para fusión de concentrado se basa en cinco etapas fundamentales: selección de fuente energética, diseño de la estructura del horno, elección de materiales, confección de quemador y testeo de fusión.

La selección de la fuente energética consideró como variables determinantes el **poder calorífico** de la fuente, la portabilidad, la seguridad en la implementación y el nivel de contaminación que esta generaría. Para la elección de la fuente energética se comparó petróleo, carbón, gas licuado y electricidad. De todas las fuentes, el gas licuado es la que presenta un mayor poder calorífico ($48,4 \text{ kJ/kg}$), una adecuada facilidad de manejo —por medio de balones de gas—, un riesgo aceptable y un bajo nivel de contaminación.

El diseño de la estructura debe permitir múltiples fusiones sin sufrir daños de consideración. Luego, sus variables a tomar en cuenta son condiciones de operación, portabilidad y durabilidad. Se buscó lo indicado en las referencias [3], [4] y se optó por una disposición interior cilíndrica y un quemador ubicado en posición tangencial, de manera de permitir la formación de una llama helicoidal que rodee el **crisol** con el material a fundir. Esto permite una mejor distribución del calor y aumenta la vida útil de los materiales. La Figura 2 muestra el diseño interior del horno. Este además debe contar con una vía de evacuación para permitir completar el proceso de combustión, por lo cual se habilitó una salida en la tapa superior. La estructura considera también una separación con el piso, con el objetivo de disminuir las pérdidas por transferencia de calor —mediante conducción—. Las medidas fueron optimizadas para minimizar el tamaño de la cámara y mejorar la transferencia de calor. Para estos propósitos se consideró un crisol de capacidad de 200 g de concentrado de cobre. En la Figura 3 se puede observar el resultado del diseño.

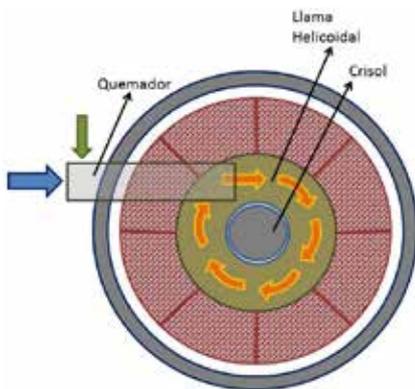


Figura 2. Diseño interior del horno.



Figura 3. Estructura metálica del horno.

La selección de materiales consideró aspectos como resistencia a altas temperaturas, deformación térmica y costo. Al evaluar los materiales **refractarios** disponibles en el mercado, se optó, desde el interior hacia el exterior del horno, por una primera capa de ladrillos refractarios, debido a su capacidad aislante y alta resistencia térmica. En segundo lugar, una capa de cemento refractario, que da rigidez a la estructura y resiste altas temperaturas. Luego, una capa de malla cerámica o Kaowool, que tiene por objetivo aislar el interior y mantener la superficie del horno a una temperatura segura para su manipulación. Y por último, una cubierta de acero de 8 mm, para mantener la estructura protegida y darle firmeza a la estructura interior.

En la Figura 4 y en la Figura 5 se observa la disposición de los materiales de aislación del horno y el proceso de manufactura de este, respectivamente.

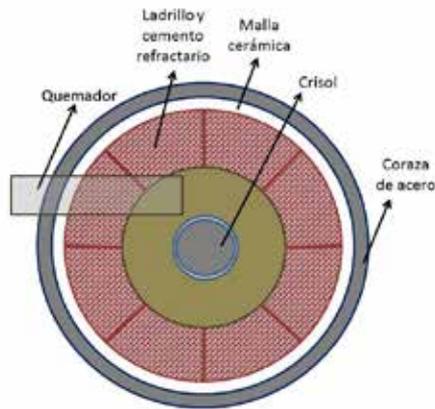


Figura 4. Materiales de aislación del horno.



Figura 5. Vista proceso de manufactura.

La confección del quemador responde a alcanzar la temperatura necesaria para fundir cobre (estable y mayor a 1250°C). En general, los quemadores para fundición superan la escala del actual diseño, por lo tanto se optó por diseñar y confeccionar uno. El diseño interior del quemador consta de un tubo o cámara de combustión que tiene dos entradas, una de aire y otra de combustible, y una salida de la llama o mezcla para la combustión. El aire circula por todo el diámetro de la tubería, pero antes de entrar en contacto con el combustible, el tubo disminuye su diámetro de tal forma que el aire ocasiona una turbulencia que provoca la mezcla homogénea con el gas. Posteriormente, esta mezcla genera combustión en la salida del quemador. Para regular la cantidad de ambos fluidos, el sistema consta con dos reguladores de tal manera que se pueda manejar la mezcla y obtener la temperatura requerida. Como la razón de aire-gas es muy alta, se necesita una fragua para abastecer el flujo de aire necesario. El diseño exterior e interior del quemador se puede apreciar en la Figura 6 y 7 respectivamente.

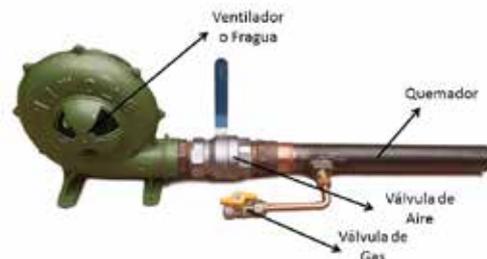


Figura 6. Diseño exterior del quemador.

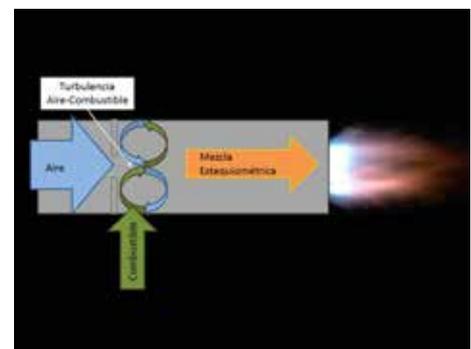


Figura 7. Diseño interior del quemador.

El proceso de testeo consistió en realizar dos ensayos de fusión, el primero con cobre puro 99,99%, para evaluar eficiencia energética del equipo. El segundo con concentrado de cobre con un agregado de sílice (SiO_2) correspondiente al 30% del peso total [5]. Este último ensayo se hizo a partir de un lote de 2 kg de concentrado de cobre preparado mediante un mostrador rotatorio, de manera de asegurar equiprobabilidad en su calidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes de iniciar la fusión, el horno debe ser calentado gradualmente para que los ladrillos se dilaten de modo lento y se eviten fisuras por expansión del material, es decir, primero se regula el flujo del quemador a baja potencia, hasta que los materiales refractarios interiores alcancen una temperatura adecuada, y luego se incrementa hasta alcanzar la máxima potencia. El flujo se regula con las válvulas de aire y gas, que controlan la razón de mezcla, de manera de asegurar que el color de la llama pase de amarillo a azul violeta, característica propia de una combustión eficiente. Este horno se puede regular

para alcanzar temperaturas mayores a los 1250°C, punto de fusión del cobre [5]. Para controlar la temperatura de operación se utiliza una termocupla de contacto. Después de regularizar el flujo, si esta indica una temperatura inferior (superior) a la requerida, se deberá abrir (cerrar) la válvula de aire en conjunto con la del gas, hasta llegar a la temperatura deseada sin perder el color óptimo de combustión de la llama.

En la Figura 8 se aprecia la distribución resultante del sistema de fusión. En la Figura 9, en tanto, se puede observar la evolución de temperatura en una experiencia de fusión, hasta alcanzar un nivel estable entre 1300-1350°C. Esta última temperatura es la necesaria para la fusión de concentrado de cobre. Al apagar el horno, el nivel de calor decrece de forma exponencial.

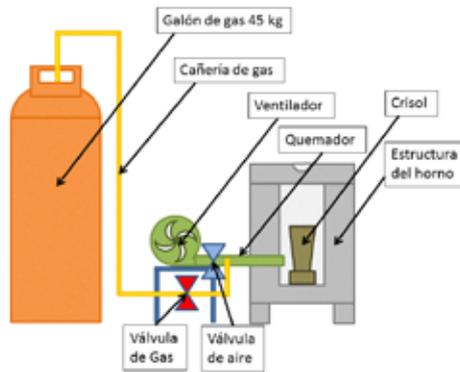


Figura 8. Distribución del sistema de fusión.

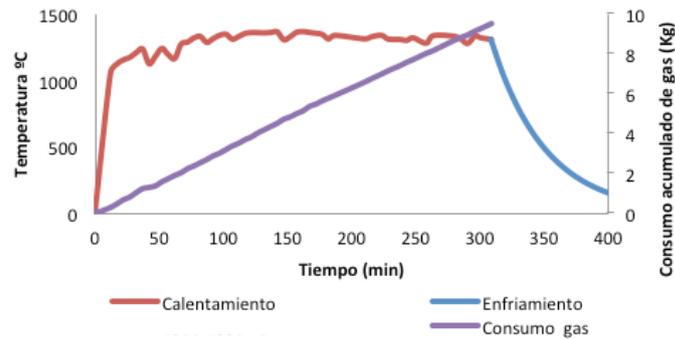


Figura 9. Evolución de la temperatura y consumo de gas en el tiempo.

La eficiencia energética (EE) del proceso corresponde al ratio de la cantidad de energía consumida versus la cantidad de energía requerida mínima para realizar el trabajo de fusión [6]. Para medir la EE del horno, se determinó la energía teórica que se debe utilizar para fundir 200 g de cobre puro, detallada según la Tabla 1, y por otro lado, se midió el consumo de gas licuado en el tiempo, tomando el peso del cilindro de gas con ayuda de una balanza electrónica. Finalmente, se comparan los dos valores y se obtiene el índice de EE del sistema. El horno requirió 80.000 kJ de calor en el gas propano. En estos términos, el horno alcanza una EE de 1% que considera las pérdidas por aislación, por conducción, convección de gas caliente, rendimiento del quemador y la eficiencia de la combustión (mezcla estequiométrica del gas y del aire).

Tabla 1. Cálculo teórico de fusión de cobre con 99,99% de pureza

Temperaturas de operación				
Temperatura ambiente	25	°C	298	K
Temperatura de fundición cobre	1.350	°C	1.623	K
Propiedades del cobre				
Masa molar	63,5			[gr/mol]
Densidad	8.960			[kg/m3]
Calor específico cobre [7]				
Cobre sólido Cu S	$22,64 + (6,28 \cdot 10^{-3}) T$	[J/mol K]	25-1.083	°C
Cobre líquido Cu L	31,38	[J/mol K]	1.083-2.595	°C
Entalpia de fusión	13.589			[J/mol]
Calor necesario para fundir un kilo de cobre				
$Q = 51.407 \text{ [J/mol]} = 810 \text{ [kJ/kg]}$				

$$Q = \int_{298}^{1356} C_p(t)_{CuS} dt + \int_{1356}^{1623} C_p(t)_{CuL} dt + \Delta H_f$$

$$Q = \left(\int_{298}^{1356} 22,64 + (6,28 \cdot 10^{-3}) T dt + \int_{1356}^{1623} 31,38 dt + 13.589 \right) \text{ [J/mol]}$$

$$Q = \left(22,635 \cdot (1.356 - 298) + 6,28 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1.356^2 - 298^2}{2} + 31,38 \cdot (1.623 - 1.356) + 13.589 \right) \text{ [J/mol]}$$

En la fundición, el concentrado de cobre alcanza los 1350°C para lograr el cambio de estado sólido a líquido. Al pasar al estado líquido y agregar sílice como fundente se separan los elementos (Cu, Fe, S) en dos fases fundidas: la fase más liviana, denominada **escoria**, queda en la superficie, y la más pesada, denominada **mata**, cae al fondo en estado líquido. La fase pesada o mata es un compuesto rico en cobre (>60% Cu) y de interés en la fusión.



Figura 10. Separación de mata y escoria.

Para este caso se consideró una muestra de concentrado de una faena minera del país con 23,7% de Cu, 25,85% de Fe y 15,8% de S. A la mezcla se le agregó sílice hasta alcanzar un 30% del peso total, como se propuso. El resultado de la separación en mata y escoria se aprecia en la Figura 10.

CONCLUSIONES

En este estudio, se planteó el desafío de diseñar un horno de pequeña escala que alcanzara la temperatura de fusión del cobre (+1250°C). Se buscó una fuente energética que tuviera alto poder calorífico, portabilidad, seguridad en la implementación y nivel de contaminación determinado, resultando ser el gas licuado la más eficaz. Se definió que la estructura del horno fuera de forma cilíndrica para que, junto con el quemador, pudieran formar una llama helicoidal que distribuyera mejor el calor; que tuviera una vía de evacuación para realizar el proceso de combustión y que estuviera separado del piso para disminuir la transferencia de calor. En cuanto a la selección de los materiales aislantes utilizados, se optó por capas de ladrillos refractarios, por su alta resistencia a la temperatura, cemento refractario que diera rigidez a la estructura, malla cerámica para mantener la superficie del horno a una temperatura manipulable, y una cubierta de acero para proteger y dar firmeza a la estructura.

El diseño adoptado probó ser adecuado para la escala definida. A través de la estructura propuesta se logró obtener altas temperaturas (1500°C) para poder fundir materiales sin la necesidad de utilizar sistemas más costosos —como equipos basados en inducción eléctrica—. Sin embargo, se recomienda seleccionar mejores materiales de aislación y mejorar el diseño para evitar pérdidas de calor y mejorar la EE del horno.

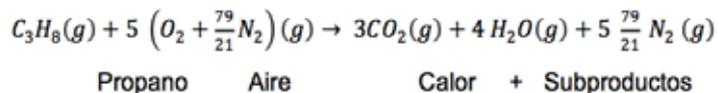
Resulta importante destacar que la manufactura del quemador fue una buena opción, ya que logró disminuir el costo total del proyecto respecto de haber adquirido uno a menos de la mitad del presupuesto. Sin embargo, se recomienda innovar en cuanto a materiales y diseño, para así lograr una mayor eficiencia, optimización en la combustión y durabilidad del quemador.

El resultado del testeo demostró que el rendimiento del horno en promedio fue de solo un 1%. Esto se puede tomar como una buena base para introducir mejoras en cualquiera de sus componentes, y así mejorar la eficiencia. Una simple manera sería utilizar oxígeno en vez de aire para la combustión, para evitar el calentamiento de nitrógeno.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Combustión de propano

La combustión de propano o gas licuado se produce con la reacción del oxígeno disponible en el sistema. Si no existen niveles exactos (estequiométricos) de oxígeno, la combustión no es eficiente, lo que puede darse en dos casos: si falta oxígeno, la combustión no es completa, por lo que la temperatura que resulta es baja; mientras que si existen niveles muy altos de oxígeno, hay una ineficiencia al perderse calor al calentar el oxígeno que no se utiliza en la combustión. Si existe oxígeno en su cantidad óptima la llama puede alcanzar niveles superiores a los 1500°C. La fórmula del propano y su reacción en la combustión se muestra a continuación:



Calor necesario para fusión del cobre

El calor necesario para fundir una determinada masa de cobre se estima en relación con el calor específico del material, que a su vez está en función de su temperatura, y del calor latente necesario para cambiar de fase sólida a líquida, siendo este último una cantidad energética significativa en el proceso de la fusión del cobre:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} C_p(t) dt + \Delta H_t$$

Fundición del concentrado de cobre

La fusión de concentrado de cobre consiste en producir cobre de ley 60% en sulfuros concentrados de cobre, con la adición de pequeñas cantidades de gangas de óxidos —como sílice, alúmina u óxido de calcio— en la fundición. Esta reacción exotérmica tiene como resultado la separación de la mezcla total en dos fases, mata y escoria. La mata es una solución de alto porcentaje de cobre —mayor a 60% de cobre— y la escoria compuesta principalmente de óxido de hierro. Esta se separa de la muestra inicial por la afinidad con las gangas de óxidos. Hay que cuidar las proporciones de gangas de óxidos o fundentes añadidas; porque, mientras más escoria se genera, mayor cantidad de cobre es el que se pierde. La ecuación de la fusión del concentrado se representa a continuación:

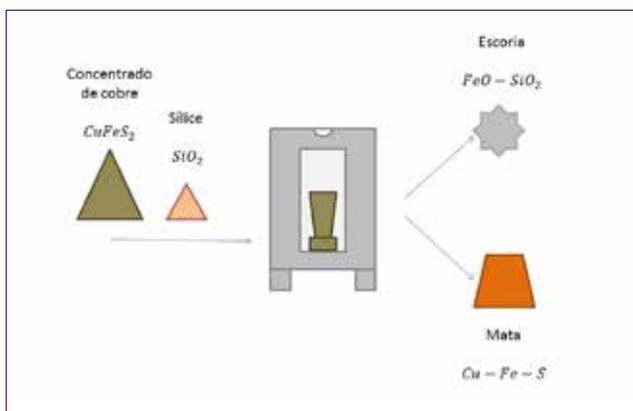
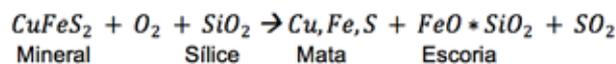


Figura 11. Separación de mata y escoria.

GLOSARIO

Concentrado de cobre: Producto del mineral ingresado a la planta de procesos, luego del chancado, molienda y flotación, con un porcentaje de cobre resultante cercano al 30%.

Pirometalurgia: Rama de la metalurgia extractiva en que se emplean procesos para obtención y refinación de metales utilizando calor, como en el caso de la fundición.

Metalurgia: Técnica de obtención y tratamiento de los metales a partir de minerales metálicos.

Cátodo: Producto final de la fusión y refinación con un contenido de un 99,99% de cobre, el cual puede ser vendido como producto final.

Poder calorífico: Cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.

Crisol: Aparato utilizado como recipiente de metales fundidos a altas temperaturas (~1500 °C), normalmente hecho de grafito con cierto contenido de arcilla.

Refractario: Material que resiste altas temperaturas, superiores a 1100°C, sin descomponerse.

Mata: Fase rica en cobre con porcentajes entre 60% y 70%, producto de valor de la fundición.

Escoria: Fase pobre en cobre con porcentajes entre 1-2%, contiene alta concentración de óxidos de hierro. Material de menor densidad que la mata, la que flota en la solución a 1250°C —esto ayuda a una fácil remoción en la fusión y conversión—.

AGRADECIMIENTOS

Especiales agradecimientos a don Luis Valdés, jefe del taller de Ingeniería Mecánica; a Juan de Dios Rivera, profesor del departamento de Mecánica; y a Pablo Pastén, profesor del departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, por su ayuda y disponibilidad.

REFERENCIAS

- [1] González, A. Riquezas minerales de Chile a nivel mundial. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. s.l. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, 2000.
- [2] Véliz P., S. Un negocio fundido, Qué Pasa (Minería): 2012.
- [3] Mc ADAMS, W. H. Heat transmission. McGraw-Hill, vol. 3: 2012.
- [4] Gingery, D. Building gas fired crusable furnace. Chicago s.n: 1988.
- [5] King, M. J., Sole, K. C., Davenport , W. G. Extractive metallurgy of copper. s.l. Elsevier: 2011.
- [6] Potter, M. C., Somerton, C. W. Schaum's outline of theory and problems of engineering thermodynamics. McGraw-Hill: 1993.
- [7] Rao, Y. K. Stoichiometry and thermodynamics of metallurgical processes. Cambridge University Press, CUP Archive:1985.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Rino Guajardo
- 2 Matías Zamorano
- 3 Profesor Álvaro Videla



1

2

3



“Moisés”: desarrollando un proyecto de diseño aplicado en ingeniería

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Gonzalo Camps Vinagre¹, alumno de tercer año

Leonardo Villarroel Araya², alumno de tercer año

Catalina Cortázar Valdés³, profesora asistente adjunto

Constanza Miranda Mendoza³, profesora asistente, directora DILAB

¹COLLEGE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

²ESCUELA DE INGENIERÍA

³DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y METALÚRGICA, ESCUELA DE INGENIERÍA

INTRODUCCIÓN

Este proyecto de diseño aplicado en ingeniería nace como continuación del curso “Desafíos de la Ingeniería”, el que tuvo como objetivo diseñar una herramienta para facilitar el trabajo del área obrera nacional. En este contexto, se escogió como oportunidad de diseño la dificultad para abrir mariscos **bivalvos**. Este proyecto se continuó desarrollando a través de una investigación que formó parte del mayor IDI (Ingeniería, Diseño e Innovación).

Chile es un país que posee una costa de 83.850 km, sumando territorio continental e islas adyacentes. Según la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), durante el año 2013 el desembarque total en el país de productos acuícolas fue de alrededor de tres millones de toneladas, siendo un 50% de carácter artesanal [1]. El Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (Sernapesca), por su parte, estima que el 22% de esta proporción corresponde a mariscos [2]. De estos datos se puede concluir que más de 300.000 toneladas de mariscos son extraídas artesanalmente cada año.

Según lo recopilado en más de quince salidas a terreno a centros donde se venden estos productos al público, se pudo constatar que una considerable mayoría de los comerciantes usa cuchillos al momento de abrir mariscos. Los riesgos que implica este método, además de la fuerza física requerida, traen como consecuencia que esta sea una actividad segregadora de géneros, al ser realizada mayormente por hombres. Es por estos motivos que se propuso diseñar un artefacto para abrir mariscos bivalvos, que sería llamado “Moisés”.

Este artículo muestra la metodología de trabajo empleada, la que es aplicable para desarrollar cualquier iniciativa de diseño basada en el usuario. Además, muestra cómo a partir del análisis de la información obtenida en salidas a terreno, se definen los requerimientos para el diseño de “Moisés”, el que será testeado y evaluado por los mismos usuarios hasta definir su diseño final.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada consistió en cinco fases de carácter iterativo (Figura 1).

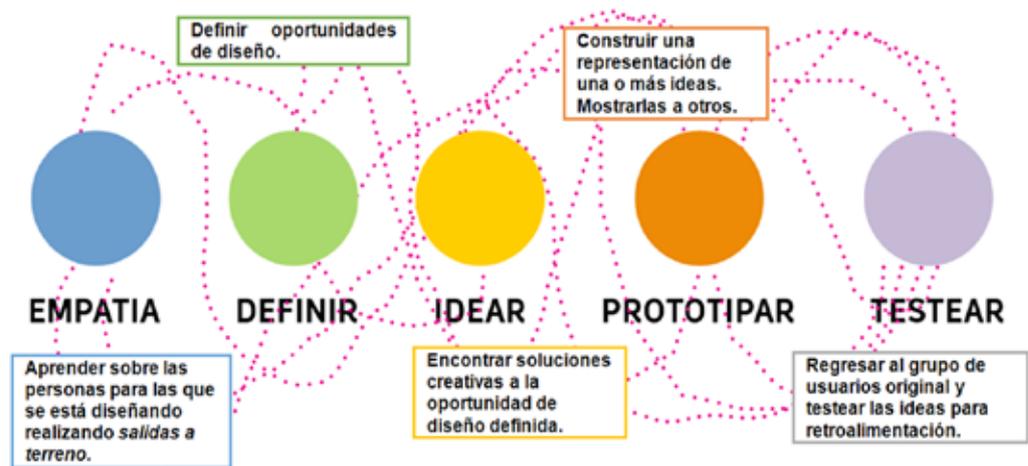


Figura 1. Metodología. Imagen adaptada de *dSchool*, Stanford [3].

Con el fin de compartir con los trabajadores y estudiar las dificultades a las que se enfrentan durante sus labores, se efectuaron salidas a terreno a los siguientes lugares: el Mercado Central de Santiago, la Vega Central y el Persa Biobío. Luego, habiendo estudiado estos escenarios, se definió el desafío de abrir mariscos bivalvos como oportunidad de diseño debido a la cantidad de potenciales usuarios beneficiados.

Se realizó un estudio de mercado sobre los actuales artefactos preferidos para abrir mariscos, a partir del cual se encontraron los siguientes: cuchillo común, cuchillo abridor de ostras, máquina abridora de ostras y cuchillo de doble mango para almejas. Si bien estos son aparatos funcionales, no proveen la seguridad y comodidad que los usuarios desean.

Conocida la competencia, se ideó una herramienta para abrir mariscos bivalvos. Esta basó su funcionamiento en un mecanismo de palanca inversa, con el fin de generar una fuerza opositora a la generada por los bivalvos. Al introducir las puntas en las ranuras de las carcasas de los bivalvos y juntar los mangos, se separan las puntas provocando la apertura del marisco (Figura 2).

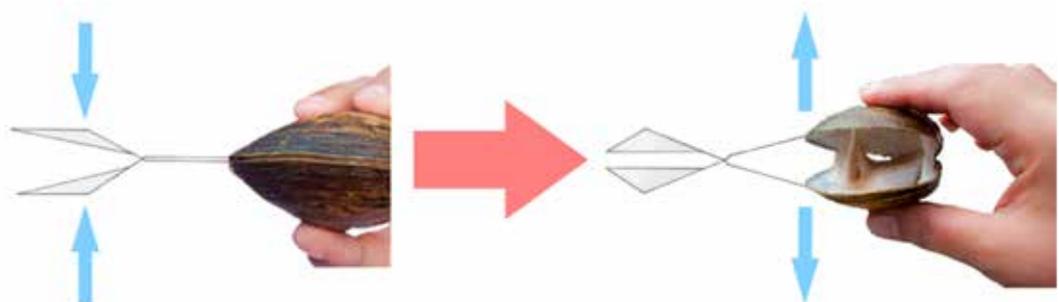


Figura 2. Mecanismo de palanca como método.

Para concretar esta idea se llevó a cabo un estudio sobre la **morfología** y los métodos utilizados para abrir bivalvos de las siguientes familias: almejas, choros y machas. Así, se diseñaron distintas puntas eficientes según las zonas de inserción más recurrentes para cada marisco, que serían intercambiables (Figura 3).

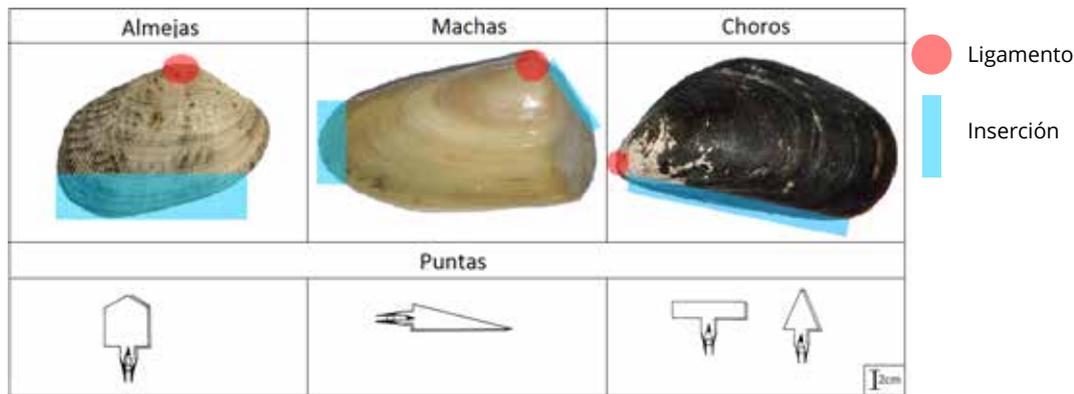


Figura 3. Cuadro comparativo de mariscos y sus puntas.

Por último, para comparar los diseños se utilizó la **matriz de Pugh**. Para desarrollar esta herramienta es necesario escoger criterios medibles constituyentes de cada elemento a comparar. A cada criterio analizado se le debe asignar una importancia que se encuentre dentro de un intervalo cerrado a elección (en este caso [1,5] siendo 5 más importante). Luego, es necesario que los valores de cada criterio de los elementos a comparar estén en la misma escala. Para esto se debe dividir el valor del criterio de cada elemento por el valor del elemento que sea mayor en su respectiva categoría. En caso de que el criterio afecte negativamente a los elementos a comparar de acuerdo a los requerimientos, los números obtenidos deben dejarse expresados como negativos y, en caso contrario, positivos. Finalmente, se multiplica la cifra asignada a cada criterio por su importancia y se suma el resultado para cada elemento a cotejar. Con estos resultados, se identifica como mejor opción al elemento cuyo indicador de Pugh sea mayor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procedió a realizar el primer prototipo: un alicate para circlips al que se le intercambian las puntas ideadas (Figura 4). Este primer prototipo fue testeado con diferentes usuarios, tales como faenadores y dueños de casa. El propósito de este testeo era recibir retroalimentación de los potenciales usuarios de "Moisés". Según lo sugerido por expertos en el rubro, una herramienta para abrir mariscos "debiese ser higiénica, rápida y segura".

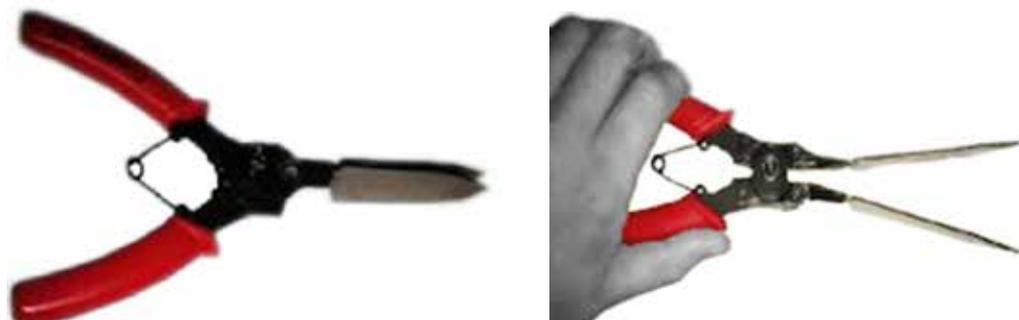


Figura 4. Prototipo 1.

Basándonos en la retroalimentación recibida se decidió, en primera instancia, enfocarse en diseñar una herramienta más rápida. Para esto se decidió diseñar una sola punta universal, eliminando el concepto de puntas intercambiables (Figura 5). Para la construcción del segundo prototipo se utilizó un removedor de anillos de pistón, al que se le soldaron puntas de acero similares a las antes bosquejadas (Figura 6).

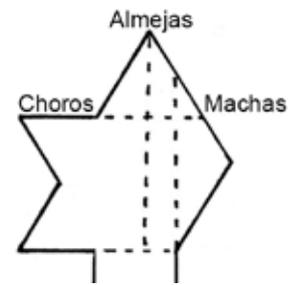


Figura 5. Puntas diseño 2.

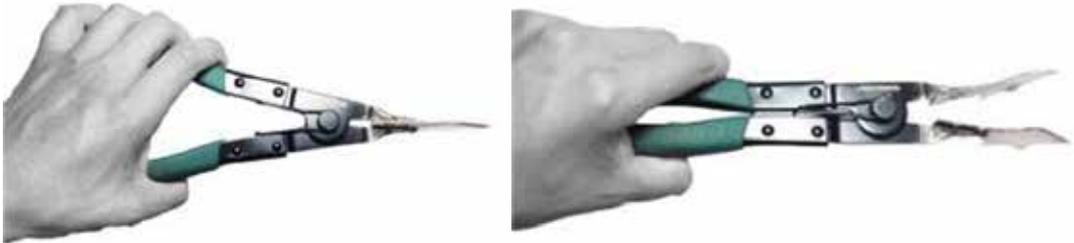


Figura 6. Prototipo 2.

Al testear este segundo prototipo los usuarios confirmaron su funcionalidad. Sin embargo, el grosor y filo de las puntas complicaron la inserción de estas dentro de la ranura de las almejas cerradas. Por otra parte, el mango resbalaba con facilidad, y retenía tanto la humedad como los olores.

Así, se decidió construir un tercer prototipo, cuya diferencia respecto del anterior radicó en que los mangos fueron revestidos con un *grip* deportivo, impermeable, antideslizante y que no retenía ni olores o humedad, además de varias capas de pintura anticorrosiva y la impresión láser del logo en su mango. De esta manera se logró un prototipo más *rápido, seguro e higiénico* y con un acabado más estético (Figura 7). La propuesta fue presentada en la feria tecnológica del curso. Posteriormente, cuando las pruebas continuaron en una asignatura de Investigación o Proyecto (IoP), se estimó conveniente definir cuatro contextos (puestos comerciales, restaurantes, restaurantes *gourmet* y hogares) y hacer nuevas salidas a terreno, en las que más de 40 personas accedieron a participar. Toda la información útil recolectada durante el desarrollo del proyecto fue bajada y sintetizada en tablas comparativas.



Figura 7. Prototipo 3.

Se construyó una tabla de comparación de los requerimientos de cada contexto (Tablas 1, 2 y 3). Se encontró, por ejemplo, que la almeja es el marisco más utilizado, y a la vez, el más difícil de abrir.

Tabla 1. Pre-testeo.

	Restaurantes	Restaurantes <i>gourmet</i>	Pescaderías	Hogares
Herramienta más utilizada	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo
Posición en la curva de aprendizaje	Alta	Media, suelen comprarlos abiertos	Alta	Baja
Marisco más trabajado	Almeja	Almeja	Almeja	Almeja
Normas de higiene	Se manipulan distintos tipos de mariscos con el mismo cuchillo	Se usa una herramienta distinta para cada tipo de marisco	Se manipulan distintos tipos de mariscos con el mismo cuchillo	Se manipulan distintos tipos de mariscos con el mismo cuchillo

Tabla 2. Frecuencia y categorización de la información.

	Restaurantes	Restaurantes <i>gourmet</i>	Pescaderías	Hogares
Maestría para abrir mariscos	Alta	Media	Alta	Baja
¿Es una actividad grata?	No	No	Sí	No
¿Se cortan?	Sí	Sí	Sí	Sí
Marisco más utilizado/vendido	Almeja	Almeja	Almeja	Almeja
Frecuencia de abrir mariscos	Diaria	Baja	Diaria	Baja
Herramienta para almejas	Cuchillo doble mango	Cuchillo	Cuchillo doble mango	Cuchillo
Herramienta para machas	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo
Herramienta para ostiones	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo
Herramienta para choros	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo
Herramienta para ostras	Abridor de ostras	Abridor de ostras	Abridor de ostras	Cuchillo
Malestares posteriores	No tienen	Alergias/cortes	No tienen	Cansancio

Para la siguiente tabla es importante recalcar que en cada sector los usuarios se encuentran en distintos lugares de la curva de aprendizaje (Tabla 3).

Tabla 3. Post-testeo.

Cuchillo vs. "Moisés"	Restaurantes	Restaurantes <i>gourmet</i>	Pescaderías	Hogares
¿Qué es más cómodo?	Cuchillo	Moisés	Cuchillo	Moisés
¿Qué es más seguro?	Cuchillo	Moisés	Cuchillo	Moisés
¿Qué es más rápido?	Cuchillo	Cuchillo	Cuchillo	Moisés
¿Qué ocuparía?	Cuchillo	Moisés	Cuchillo	Moisés
¿Qué es lo que menos les gustó de "Moisés"?	Puntas gruesas. Difícil de manipular.	Puntas gruesas. Difícil de manipular. Lentitud. Ángulo de apertura insuficiente.	Puntas gruesas. Difícil de manipular. Lentitud. Ángulo de apertura insuficiente.	Puntas gruesas. Relativamente difícil de manipular. Si no se introduce correctamente suele romper las conchas.

De las tablas de comparación, se determinaron los siguientes requerimientos:

- Construir puntas de una resistencia y un grosor tal que sea capaz de insertarse y abrir todos los mariscos, incluso almejas.
- Asemejar el mecanismo al movimiento tradicional de apertura con cuchillo.
- Aumentar el ángulo de apertura de las puntas y reducir el largo de la herramienta.

A partir de estos requerimientos, se ideó una herramienta del porte de una mano, que pone en práctica el mismo sistema de palanca inversa, pero con las puntas en la cara lateral.

Para la construcción del dispositivo, se emplearon planchas de MDF que fueron adheridas a presión, pulidas con un Dremel y unidas con un eje metálico (Figura 8). El prototipo cumplió con los requerimientos, pero no era lo suficientemente resistente, pues el sistema del eje era débil.

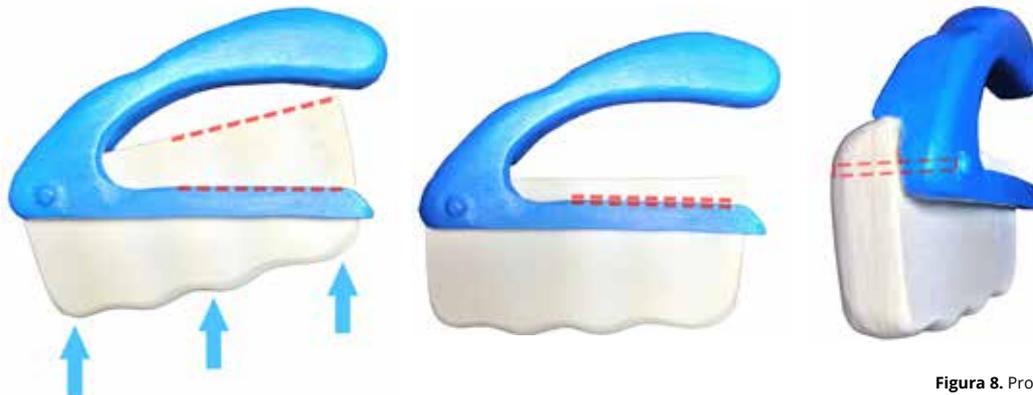


Figura 8. Prototipo 4.

Empleando las mismas técnicas se construyó un nuevo prototipo con un mango de mayor volumen que contenía, por ambos perfiles, a la pieza central. A esta pieza central se le unió un resorte que mantenía los cuchillos en su posición de inserción (Figura 9).

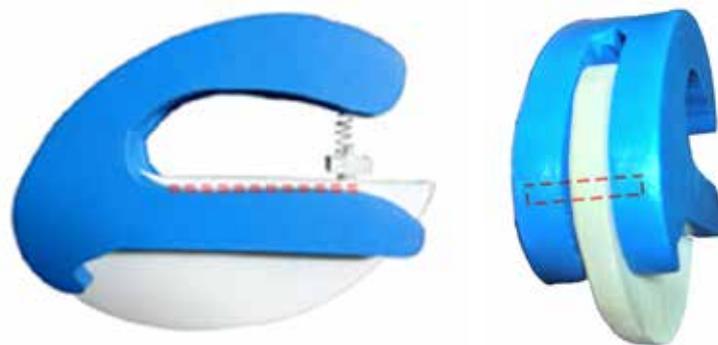


Figura 9. Prototipo 5.

Una vez diseñado el dispositivo, se procedió a confeccionar la matriz de Pugh para comparar este último diseño con el prototipo 3 (Tabla 4 y 5). Se consideraron seis criterios: largo, peso, número de puntas, grosor de las puntas, resistencia de las puntas y ángulo de apertura. Los criterios de largo, peso y grosor afectan negativamente al prototipo.

Tabla 4. Características e importancia.

Criterio	Importancia	Prototipo 3	Diseño 5
Largo (cm)	4	27	9,5
Peso (g)	2	278	55
Número de puntas	2	3	1
Grosor de las puntas (mm)	5	2	0,8
Resistencia de las puntas en relación con el material (MPa)	5	500	500
Ángulo de apertura	4	25°	27°

Tabla 5. Resultados e indicador.

Criterio	Prototipo 3	Diseño 5
Largo	-1	-0,35
Peso	-1	-0,2
Número de puntas	1	0,3
Grosor de las puntas	-1	-0,4
Resistencia de las puntas en relación con el material	1	1
Ángulo de apertura	0,925	1
Indicador Pugh	-0,3	5,8

En este caso, los resultados evidenciarían que el último diseño es 19,3 veces “una mejor opción”. Finalmente, para materializar el último diseño elaborado, se procedió a hacer un plano de la herramienta en CAD 3D Inventor (Figura 10), la que sería impresa en 3D (Figura 11), consiguiéndose un nueva versión.

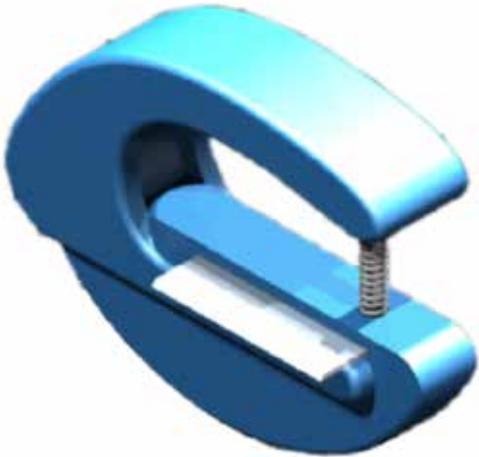


Figura 10. Plano de la herramienta.



Figura 11. Prototipo 6.

CONCLUSIÓN

Mediante la aplicación de la metodología centrada en el usuario ya explicada se logró concretar una idea que soluciona el problema de abrir moluscos.

Se evidenció que tanto la cantidad como la calidad de información recopilada a partir de los usuarios, es igualmente importante para un posterior análisis y definición de requerimientos. Esto último puede verificarse observando que un mejor modo de obtener y analizar la información permitió finalmente construir un prototipo 19,3 veces mejor que el anterior, según lo arrojado por la matriz de Pugh.

Resultó importante basarse en la técnica tradicional empleada por los usuarios, propia de una actividad artesanal como esta, para desarrollar una herramienta que cumpliera con sus expectativas.

En otro ámbito, resultó fundamental la retroalimentación arrojada por los propios usuarios durante los testeos, pues para que la solución construida esté enfocada en las personas y en las dificultades que se les presentan en su trabajo, estos deben ser involucrados y constituir agentes activos del desarrollo del diseño y el proyecto en sí.

El próximo paso para terminar de desarrollar a “Moisés” será definir las puntas que incorporará. Para esto el prototipo más reciente se diseñó con dos ranuras, en las que se podrán probar distintos tipos de puntas (Figura 12), con el fin de realizar nuevos testeos, evaluar metodológicamente el prototipo, concretar cambios pertinentes y dar por acabado el proyecto.

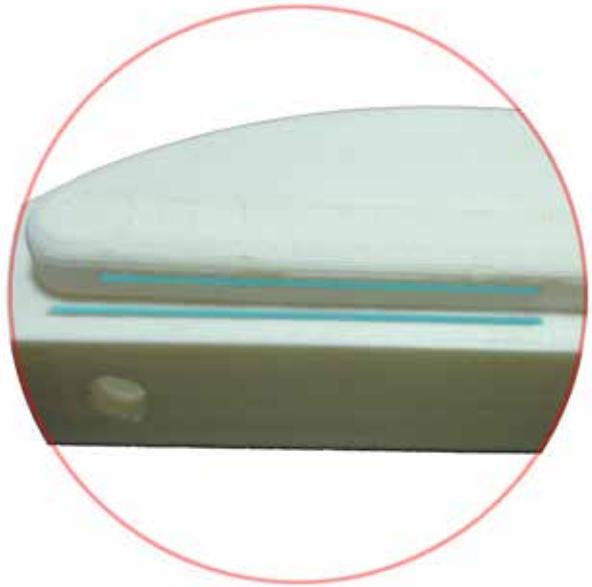


Figura 12. Ranuras puntas intercambiables.

GLOSARIO

Bivalvo: Palabra compuesta que viene de Bivalvia (en que Bi = dos y Valvia = placa). Para el caso de este documento se habla sobre mariscos bivalvos, es decir, mariscos con un caparazón que presenta dos placas laterales unidas por ligamentos.

Morfología: En el lenguaje biológico se hace uso de este concepto para describir la estructura de seres vivos o sistemas con el fin de comparar y catalogar en distintas áreas de estudio.

Matriz de Pugh: Tabla comparativa de dos o más elementos que sirve para facilitar la toma de decisiones. El propósito de esta tabla es lograr cuantificar y objetivar “qué tan buena es una opción por sobre otras” de manera numérica, evaluando las propiedades de cada elemento a comparar.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a todos los docentes encargados del curso “Desafíos de la Ingeniería”, en especial a la profesora Ángela Decar y al instructor Pablo César Gaete M. También agradecemos a los compañeros del grupo 7 de “Desafíos de la Ingeniería” (2-2013): Macarena Cortés, Raimundo del Río, Matías Ipinza, Benjamin Lahsen, José Miguel Lira, Piera Sadini, Matías Orellana, Tomás Villanueva.

REFERENCIAS

1..Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Sector pesquero y acuícola. FAO, Santiago de Chile.. Autor: Cox, Francisco,. Capítulo II.2. (Empleo): 8, 2013. Disponible en World Wide Web: http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1394541106sectorPesquero.pdf

2..Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. Actividades de fiscalización efectuadas en materia de pesca y acuicultura en el año 2013 [Valparaíso, Chile]. Parte 1.3 (Pesca artesanal): 4, 2014. Disponible en World Wide Web: http://www.sernapesca.cl/presentaciones/Informe_Fiscalizaci%C3%B3n_Sernapesca_2013_20140402.pdf

3. Stanford University Institute of Design. The virtual crash course in design thinking. Fecha de consulta: 4 de noviembre, de 2014. Disponible en World Wide Web: <http://dschool.stanford.edu/dgift/>

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Gonzalo Camps Vinagre
- 2 Leonardo Villarroel Araya
- 3 Profesora Catalina Cortázar
- 4 Profesora Constanza Miranda



