

Revista Chilena de

INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 / N° 504 / Abril 2025



Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 137, N° 1 / ISSN 0716 - 2340

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

Juan Carlos Barros Monge

Primer Vicepresidente

Ricardo Nicolau del Roure G.

Segunda Vicepresidenta

Ximena Vargas Mesa

Secretario

Germán Millán Valdés

Prosecretario

Mauro Grossi Pasche

Tesorero

Jorge Pedrals Guerrero

Protesorero

Javier García Monge

DIRECTORIO 2025

Alejandra Acuña Villalobos

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Pablo Daud Miranda

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Javier García Monge

Jorge Gironás León

Mauro Grossi Pasche

Cristian Hermansen Rebolledo

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Verónica Patiño Sánchez

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Ximena Vargas Mesa

Scarlett Vásquez Paulus

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS

MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGÍA
E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, ACHISINA.

Presidente: Jorge Carvallo W.

ASOCIACIÓN INTERAMERICANA
DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL –
CAPÍTULO CHILENO, AIDIS.

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA, SOCHID.

Presidente: Jorge Gironás L.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, SOCHIGE.

Presidente: Paulo Oróstegui T.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
DE TRANSPORTE, SOCHITRAN.

Presidenta: Camila Balbontín T.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, SOCHEDI.

Presidente: Raúl Benavente G.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Seguridad Hídrica.

Presidenta: Ximena Vargas M.

Infraestructura Digital para el Siglo XXI.

Presidente: José Orlandini R.

Encadenamientos Productivos en torno al Hidrógeno Verde en Chile.

Presidente: Cristian Hermansen R.

Desafíos para la Ingeniería en Relación con la Seguridad Alimentaria.

Presidente: Javier García M.

Ingenieros en la Historia Presente.

Presidente: Miguel Ropert D.

Convergencia Biológica Digital.

Presidente: Alejandro Steiner T.

Ingeniería y Seguridad (Ad-hoc).

Presidente: Raúl Manásevich T.

CONSEJO CONSULTIVO

Raquel Alfaro Fernandois

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Francisco Brieua Rodríguez

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Joaquín Cordua Sommer

Raúl Demangel Castro

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Sergio Lavanchy Merino

Agustín León Tapia

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Pérez

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Andrés Navarro Haeussler

Ricardo Nicolau del Roure G.

Guillermo Noguera Larraín

Luis Pinilla Bañados

José Rodríguez Pérez

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

Hans Weber Münnich

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Nuestra portada

En el año 2006 comienza la construcción de este fabuloso radiotelescopio ALMA, que cuenta con 66 antenas parabólicas de 12 metros de diámetro cada una, con capacidad de observar hasta 950 gigahertz, que es una frecuencia altísima, mucho más alta que cualquier frecuencia utilizada comercialmente.

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 504, abril de 2025

Dirección: San Martín N° 352, Santiago
Teléfonos: (+56) 22696 8647 – (+56) 93736 0656
e-mail: secretaria@institutodeingenierosdechile.cl
www.iing.cl

DIRECTOR

Javier García M.

CONSEJO EDITORIAL

Álvaro Fischer A.
Roberto Fuenzalida G.
Tomás Guendelman B.
Jaime Illanes P.
Germán Millán P.
Mauricio Sarrazin A.

REPRESENTANTE LEGAL

Juan Carlos Barros Monge

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL.

Pág. 2

MINERÍA Y DESARROLLO EN CHILE: UNA VISIÓN DEL FUTURO.

Pág. 4

Conferencia del Sr. Juan Carlos Guajardo,
Fundador y Director Ejecutivo de Plusmining.

DESARROLLO DE TECNOLOGÍA DE VANGUARDIA PARA LA ASTRONOMÍA GLOBAL.

Pág. 26

Conferencias de los Sres. Ricardo Finger,
Profesor Asociado del Departamento de
Astronomía de la Universidad de Chile,
y Francisco Förster, Profesor Titular de la
Universidad de Chile.

ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS.

Pág. 53

- SRA. SALOMÉ MARTÍNEZ SALAZAR
- SR. ANDRÉS NAVARRO HAEUSSLER

RECONOCIMIENTO AL SR. RAÚL URIBE SAWADA.

Pág. 58

Las conferencias que se realizaron en noviembre de 2024 en el Instituto de Ingenieros de Chile, estuvieron centradas en dos temas de gran importancia para el país: Minería y Astronomía. El 7 de noviembre, se realizó la conferencia **“Desarrollo de Tecnología de Vanguardia para la Astronomía Global”**. En la ocasión los expositores invitados fueron los señores Ricardo Finger y Francisco Förster, y el 28 de noviembre fue el turno del señor Juan Carlos Guajardo, cuya conferencia se tituló **“Minería y Desarrollo en Chile: una Visión del Futuro”**.

El señor Finger es Ingeniero Civil Eléctrico, Doctor en Ingeniería Eléctrica y Licenciado en Física de la Universidad de Chile, quien expuso sobre el tema **“Instrumentación astronómica y transferencia tecnológica”**. Lidera los esfuerzos de transferencia tecnológica del Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA). En su conferencia se refirió al proyecto de diseño y construcción del sistema óptico receptor de la Banda 1 del Observatorio ALMA y al desarrollo de lentes para Banda 2, temas de frontera en instrumentación astronómica. Su conferencia trató esencialmente dos tópicos: el desarrollo de instrumentación astronómica en Chile y el potencial de transferencia de esta tecnología, desde la academia a la industria. Su laboratorio se encuentra en Cerro Calán y el equipo humano que lo acompaña está constituido por 20 personas.

La construcción del radiotelescopio ALMA se inició en 2006 y cuenta con 66 antenas parabólicas de 12 metros de diámetro cada una. El proyecto consideraba seis bandas, pero se centró en un prototipo de sólo una de ellas, con el objetivo de demostrar a la comunidad astronómica y tecnológica internacional que es una tecnología que se podría realizar en Chile. Ese fue el inicio de la idea de hacer instrumentación astronómica en su laboratorio, tarea que tomó alrededor de seis años y que fue realizada, principalmente, por estudiantes de magister y doctorado. Destaca que nunca antes un instituto chileno había puesto en un telescopio un componente de alta tecnología. Ahora están trabajando en un receptor de la banda 2, que triplica la frecuencia y el ancho de banda del prototipo. Finalmente, el señor Finger mostró ejemplos concretos de transferencia de sus desarrollos a la industria.

El señor Förster es Astrónomo, Ingeniero Civil de la Universidad de Chile y Doctor de la Universidad de Oxford. Dictó una conferencia titulada **“ALeRCE: El Broker Astronómico Chileno”**. Estudió los progenitores de supernovas de tipo Ia (sistema de dos estrellas que orbitan entre sí). Lideró la instalación de un telescopio robótico en Cerro Tololo (CTIO) en 2011. En su presentación mostró el trabajo que está realizando con su equipo para procesar el gran volumen de datos que generará el telescopio Vera Rubin que, al combinar técnicas de astronomía y big data, revolucionará nuestra comprensión del universo.

ALeRCE, es un proyecto interinstitucional e interdisciplinario. El equipo cuenta con astrónomos e ingenieros, combinación que le da la riqueza a este proyecto. El financiamiento de esta iniciativa proviene de diversas fuentes y junto a otros proyectos tecnológicos de tipo astronómico, genera aportes que crecen de manera exponencial en el tiempo. Se van reportando cambios que ocurren en el cielo a una tasa que una persona no es capaz de procesar, lo que justifica la necesidad de nuevas capas, que se llaman los Brokers comunitarios. Entre otros, los 7 Brokers de Rubin, donde se ubica ALeRCE, son los intermediarios con otros Brokers, especialistas en casos científicos diferentes, y sobre todo con los telescopios de seguimiento.

Este telescopio se construye con la finalidad de contribuir a enriquecer el inventario de todo lo que está en el sistema solar, así como para explicar aquellos objetos que podrían presentar algún riesgo para el planeta y poder reaccionar con tiempo. Para ello, se preguntan: Queremos entender la naturaleza de los fenómenos, ¿cómo y por qué se expande el universo? ¿cómo se forman los elementos de la tabla periódica? ¿Cómo explicar la naturaleza de los agujeros negros supermasivos, la naturaleza de estrellas variables y también la naturaleza de los objetos del sistema solar?

El señor Guajardo es Doctor en Economía Internacional y Desarrollo, Fundador y Director Ejecutivo de Plusmining. En su presentación realizó una exhaustiva revisión del papel de la minería en el desarrollo de Chile, explorando logros históricos y sus limitaciones en el contexto actual. Hizo una reflexión importante sobre lo que implica para el desarrollo del país, porque muchas veces se parte del supuesto de que la minería es una plataforma de desarrollo o el sueldo de Chile, pudiendo observarse que existe un número creciente de personas que no lo cree.

A partir de abundante información objetiva, se refiere a la conocida visión de la minería de Chile como la viga maestra del desarrollo y también, como el sueldo de Chile. El prefiere hablar de plataforma de desarrollo, porque es una base sobre la cual hay que trabajar para poder llegar a los niveles más avanzados. Ahora ha llegado otra visión, que le parece muy perniciosa y peyorativa: la minería es una actividad extractivista. En su presentación se extiende conceptualmente en el tema.

La gran expansión minera de los años 90 fue sin duda épica, gigantesca, pero esa inversión ha ido madurando y hoy tenemos un parque antiguo y los desafíos y los problemas que hay que resolver van en aumento. El desafío cultural está presente, ya que no es tan claro que exista un consenso de que la minería es el motor de desarrollo y eso también ha ido estableciendo mayores desafíos. Tenemos una industria minera que está muy desafiada en el país. Chile llegó a tener más del 40% de toda la producción de cobre vía óxido, que es la parte superficial de los grandes yacimientos de cobre, lo que se ha ido agotando rápidamente y hoy tenemos más bien la parte inferior de los yacimientos que tiene desafíos más importantes. Los proyectos se han ido desarrollando en ubicaciones cada vez más difíciles, donde las condiciones climáticas son desafiantes. Se refiere a la Alta Cordillera, donde se registran cambios regulatorios en materia de propiedad minera que no se abordaron a tiempo.

La aprobación de proyectos entró en una fase de discrecionalidad compleja, la judicialización ha venido acompañada por actores principalmente ambientalistas que han comenzado a intervenir, hay ineficiencia en los tiempos de los permisos ambientales, entre otros. La carga fiscal ha ido aumentando y en materia de infraestructura y logística el Estado también ha ido rezagándose. Propone que la institucionalidad ambiental tenga un cambio muy sustantivo, que sea profesional y no política. Señala que debe haber una instancia política en algún momento inicial de la evaluación de un proyecto, pero de ahí en adelante, tiene que ser profesional. Por último, no hay que olvidar que las empresas mineras del Estado, para un modelo integrado, tienen que ser efectivas para poder desarrollar todas sus potencialidades.

En relación al habitual reconocimiento que en esta revista se da a **Ingenieros Destacados**, tarea que lleva a cabo la Comisión de Ingenieros en la Historia Presente, se incluyen las entrevistas realizadas a don Andrés Navarro y a doña Salomé Martínez, quienes exhiben una larga y muy destacada trayectoria.

MINERÍA Y DESARROLLO EN CHILE: UNA VISIÓN DEL FUTURO

Conferencia del Sr. Juan Carlos Guajardo, Fundador y Director Ejecutivo de Plusmining.



Sr. Juan Carlos Guajardo.

El pasado 28 de noviembre de 2024, se realizó la conferencia del Sr. Juan Carlos Guajardo, Fundador y Director Ejecutivo de Plusmining, titulada: “Minería y Desarrollo en Chile: una Visión del Futuro”.

Juan Carlos Guajardo Beltrán es un destacado ejecutivo con más de 25 años de experiencia en la industria minera y en consultoría estratégica. Como fundador y director ejecutivo de Plusmining, firma establecida en 2015, ha logrado posicionarla como un referente en análisis y asesoría dentro del sector minero.

Anteriormente, fue director ejecutivo del Centro de Estudios del Cobre y la Minería (Cesco), donde impulsó su rol en debates sobre políticas mineras y encabezó eventos de gran relevancia, como la Asia Copper Week en Shanghái. Su experiencia incluye también roles de dirección en la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) y como economista del Grupo Internacional de Estudios del Cobre (ICSG) en Portugal, contribuyendo significativamente al desarrollo de estudios y estadísticas del mercado global de cobre.

El Sr. Guajardo posee un doctorado en Economía Internacional y Desarrollo, de la Universidad Complutense de Madrid y ha complementado su formación con programas avanzados en Japón y Suecia. Es miembro del Comité de Expertos sobre el Precio del Cobre del Ministerio de Hacienda de Chile desde 2004 y ha sido parte del Comité de Asuntos Internacionales del PDAC en Canadá. Su participación como orador en conferencias internacionales lo destaca como líder de opinión en temas mineros, y su red de contactos internacionales, especialmente en Asia y América Latina, le permite ofrecer una perspectiva estratégica y soluciones efectivas adaptadas a las complejidades de la industria minera global.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—Muy buenos días, bienvenidos a todos. Continuando con nuestras conferencias mensuales, hoy nos complace contar con la exposición de don Juan Carlos Guajardo Fundador y Director Ejecutivo de Plusmining.

Su presentación abordará una revisión del papel de la minería en el desarrollo de Chile, explorando tanto sus logros históricos como sus limitaciones en el contexto actual. Partiendo de un análisis de las tendencias operativas y los desafíos regulatorios que enfrenta el sector, se pondrán en perspectiva las crecientes demandas por sostenibilidad y los cambios estructurales en la industria bajo las grandes tendencias que ocurren en el mundo en el ámbito geopolítico como de transición energética.

Hace de moderador, nuestro vicepresidente don Ricardo Nicolau del Roure.

Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

—Buenos días a nuestros estimados socios y socias del Instituto de Ingenieros y además les doy la bienvenida a todos los que se han integrado para escuchar esta interesante charla que nos va a presentar don Juan Carlos Guajardo, conocido experto en temas de minería, cuyo título es *Minería y desarrollo en Chile: Una visión de futuro*.

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Muchas gracias, Ricardo por la generosa presentación y por supuesto al Instituto de Ingenieros de Chile por haber considerado oportuno invitarme a realizar esta conferencia.

Es un honor poder expresar mis puntos de vista sobre un tema tan relevante como la minería y, especialmente, poder hacer una reflexión sobre lo que implica para el desarrollo del país. Me parece muy importante esto porque muchas veces se parte del supuesto de que la minería es una plataforma de desarrollo o el sueldo de Chile.

Hay muchas interpretaciones que vinculan automáticamente la actividad minera en Chile al desarrollo del país. Sin embargo, me parece necesario hacer una reflexión sobre qué significa hoy este tema. Porque hay cambios

geopolíticos, cambios globales a nivel económico, la transición energética, cambios tecnológicos, cambios políticos y muchas situaciones que están evolucionando. Esto es muy importante en nuestro país y en América Latina y todo esto me parece que nos obliga a no dar por descontado lo que muchos de los que estamos en esta conferencia creemos: que la minería es un agente de desarrollo del país. Tenemos que hacernos cargo de que existe un número creciente de personas que no lo cree y estamos enfrentando las dificultades que eso significa.

Por lo tanto, mi presentación se basa en muchas cifras, mucha información, pero se hace cargo de esta importante conexión entre minería y desarrollo de nuestro país.

Voy a partir con una pregunta provocativa (Figura 1).



Figura 1

Si Chile está en la trampa de los ingresos medios y cuál es el rol de los recursos naturales –de la minería– en esa situación. Luego voy a hablar de los beneficios del modelo mixto que ha desarrollado Chile en los últimos 30, 40 años. Luego voy a hablar de los desafíos operacionales, institucionales y culturales que tiene la industria minera actualmente, lo que señalaba al comienzo. En el punto cuatro voy a hablar de esta nueva tendencia de los minerales críticos y qué supone como oportunidad para Chile. Y, finalmente, voy a concluir con algunas ideas de cómo me parece que la industria minera en Chile tiene que plantearse hacia el futuro para que sea un agente de desarrollo significativo.

Voy a comenzar con algo que fue hecho público hace no más de dos semanas. Y es algo que me estremeció (Figura 2).

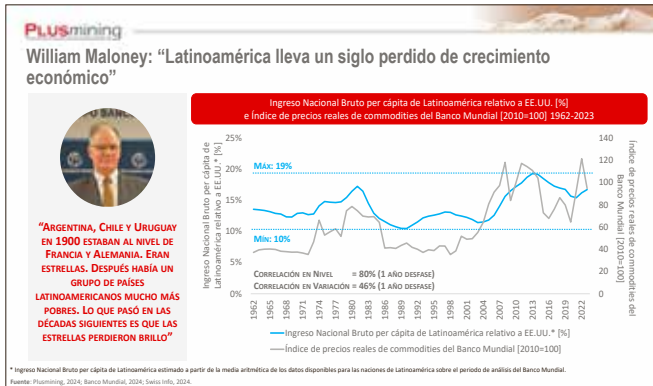


Figura 2

No sé si todos vieron esta noticia, pero el economista jefe del Banco Mundial, William Maloney, planteó que Latinoamérica lleva un siglo de crecimiento económico desperdiciado. No es que sea un año o una década perdida, como habitualmente se escuchaba. El Banco Mundial considera que América Latina ha desaprovechado un siglo.

Yo creo que hay que hacerse cargo de esa situación porque es una realidad muy importante. En el gráfico, lo que ustedes pueden ver en la línea azul es el ingreso nacional bruto per cápita de América Latina respecto de Estados Unidos. Es decir, es una ratio. Ustedes pueden ver que ha oscilado entre un 10% y un 19%. Es decir, siempre América Latina ha sido prácticamente un décimo o un quinto de lo que es la prosperidad de un país referente como Estados Unidos. Otro dato importante es la línea gris, el índice de precios reales de los *commodities*. Vean ustedes la correlación que tiene con el ingreso bruto de América Latina respecto de Estados Unidos. Nosotros calculamos la correlación. La correlación en niveles es 80% y la correlación en variaciones es 46%.

Estas son variaciones que se encuentran muy pocas veces. Por lo tanto, también hay que mencionar que la suerte que tienen los mercados de *commodities* –esto es con un año de desfase–, es trascendental para explicar el crecimiento económico. Por lo tanto, podemos comenzar diciendo que la suerte de los países de América Latina está íntimamente ligada en cuanto a su crecimiento, a su desempeño, a los precios de las materias primas.

Esto es fundamental. Pero también parece que no ha sido suficiente y es necesario plantear alternativas u otro tipo de caminos para poder romper esta brecha tan significativa en

materia de crecimiento económico. Yo voy a plantear este desafío desde el punto de vista de Chile.

Y eso es precisamente lo que quisiera mostrarles en esta lámina (Figura 3).

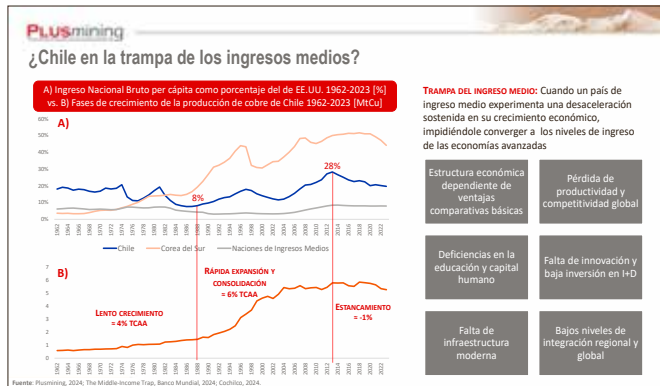


Figura 3

Está un poco complicada, por lo tanto, quiero explicarla bien. En el gráfico de arriba (A), la línea azul es el mismo indicador que teníamos en la lámina anterior, pero solo para Chile. La línea naranja representa el caso de Corea del Sur también están los países de ingreso medio en total. Lo que podemos ver es que Chile ha tenido una ratio tan bajo como 6-7%, hasta llegar a un máximo de 28%, respecto a Estados Unidos. Es importante la correlación con el gráfico de abajo, que muestra las fases de crecimiento en la producción de cobre que ha tenido Chile en el mismo periodo. Por lo tanto, la fase de mayor crecimiento de Chile en su ingreso respecto a Estados Unidos, es decir cuando acortamos la brecha más rápido con Estados Unidos en materia de ingreso, fue cuando tuvimos la fuerte expansión minera entre los años 90 y mediados de 2015. En ese periodo, la tasa de producción de cobre creció en un 6% anual. Entonces Chile pasó de 8% de la economía de Estados Unidos a un 28%. Después de eso, hemos tenido una caída en nuestro ingreso, hemos ido decayendo, y la producción de cobre se ha ido estancando. Hemos tenido un crecimiento negativo de 1% desde 2013 en adelante.

Por lo tanto, sí vale la pena plantearse que eventualmente estamos en una situación de trampa del ingreso medio. ¿Qué es la trampa del ingreso medio? Es simplemente la situación en la cual un país que viene creciendo rápidamente en base a sus ventajas comparativas más evidentes o más fáciles y

llega a un punto en el cual eso ya no es suficiente, porque hay otros países que empiezan a aprovechar sus ventajas comparativas similares a las que tiene este primer país y, por lo tanto, ya no tiene esa ventaja y no logra desarrollar otra.

Empieza a rebotar y no logra traspasar el umbral que le permite acelerar su crecimiento y converger a los niveles de países desarrollados.

¿Qué dice el Banco Mundial respecto de eso? Que los factores que inciden son una estructura económica dependiente de ventajas comparativas básicas. Ese es uno de los aspectos. El otro es la pérdida de competitividad global. La Comisión Nacional de Productividad viene diciendo hace más de una década que estamos estancados en nuestro crecimiento de productividad. Deficiencia en educación y capital humano, falta de innovación y baja inversión en investigación y desarrollo, falta de infraestructura moderna y bajos niveles de integración regional y global. Probablemente esto último no sea aplicable en el caso de Chile, pero sí el resto y me parece que son factores que obligan a poner atención a este tema.

Una cuestión fundamental que está detrás de este estancamiento que estamos viviendo, como queramos llamarlo, es que se ha ido instalando una visión dicotómica de lo que significa la minería para el desarrollo del país (Figura 4).



Figura 4

Por un lado, la visión de que los recursos naturales son una plataforma de desarrollo, a la cual yo y me imagino que muchos de los que están aquí adscribimos, como la visión de la minería de Chile como la viga maestra del desarrollo, como el sueldo de Chile. Hay muchas interpretaciones. Personalmente me gusta más hablar de plataforma de

desarrollo, porque es una base sobre la cual hay que trabajar para poder llegar a los niveles más avanzados, que es lo que estaba explicando antes. Pero ha llegado otra visión, que me parece que ha sido muy perniciosa y es la visión de que la minería es una actividad extractivista. Es una expresión peyorativa que plantea que, si solamente hacemos minería, estaríamos realizando una actividad muy primitiva y que finalmente no nos permite desarrollarnos como país. Y como pueden ver, la evolución de nuestro ingreso, la evolución de nuestra producción, sí efectivamente tuvo un techo. Por lo tanto, esta visión del extractivismo encontró campo fecundo y ha ingresado por diferentes rutas dentro del mundo político, dentro del Estado. Y ahí estamos encontrando los lomos de toro para aprobar proyectos, ahí estamos encontrando las dificultades para poder sacar adelante iniciativas de inversión relevantes. Por lo tanto, hay una dicotomía cultural que es muy importante y de la cual hay que hacerse cargo. ¿Existe el desafío del techo? ¿Hemos llegado a un techo como país en esta primera fase de desarrollo en base a recursos naturales? Me parece que sí. Pero eso no significa que tengamos que salirnos del camino y empezar a experimentar con caminos que no nos van a conducir a un buen lugar. Hay que perseverar con nuestro camino en base a los recursos naturales, pero con mayor esfuerzo, con mayor inteligencia. Eso es lo que quiero plantear hoy.

Y creo que hay ejemplos muy importantes que seguir (Figura 5).



Figura 5

Porque siempre, el planteamiento que identifica la minería con el extractivismo, cuando critica a Chile y nuestra política minera, se olvida muy fácilmente de que hay casos de éxito

extraordinariamente potentes donde los recursos naturales y la minería han sido pilares del desarrollo de los países. Está Australia, está Canadá, están los países nórdicos. En estos países la minería y los recursos naturales, no solo la minería, la industria forestal, entre otros, han sido los pilares sobre los cuales estos países se han desarrollado. Pero los agoreros del extractivismo, que piensan de esta forma, muy fácilmente se olvidan de estos casos de éxito y siguen con críticas que a mí me parece que no tienen fundamentos demasiado importantes. ¿Cuáles han sido las claves en estos países que han logrado avanzar desde la explotación de recursos mineros hacia estadios de desarrollo más altos? Primero, un pacto social fuerte entre Gobierno, trabajadores y empresarios. Segundo, fuerte desarrollo de capacidades productivas locales. Me estoy refiriendo a empresas mineras y también proveedores que logran ser exitosos internacionalmente. Una política educacional intensiva y con foco técnico. Es muy importante alinear el desafío que tiene el país con su base productiva y con la educación. Eso tiene que caminar de la mano. En estos países hay un alineamiento bastante importante de esos elementos. Por supuesto, énfasis en el conocimiento, inversión y desarrollo y también una constante dinámica de renovación y adaptación de sus políticas. Pero no quedarse estancados en lo que son las políticas iniciales.

Esa ha sido la introducción que quería dar para poder desarrollar a continuación, informaciones más específicas (Figura 6).

PLUSmining
Tabla de Contenido

- I. ¿Chile en la trampa de los ingresos medios?
- II. Beneficios del modelo mixto de desarrollo de recursos minerales en Chile**
- III. Industria minera y desafíos operacionales, institucionales y culturales
- IV. Minerales críticos y la oportunidad intergeneracional para Chile
- V. Visión del Futuro: ¿Cómo transformar la oportunidad en progreso?

Figura 6

Decía que Chile estableció un modelo mixto (Figura 7).



Figura 7

¿Y qué me parece que es relevante de este modelo mixto? Un modelo mixto que en los últimos 30, 40 años logró aglutinar de una manera virtuosa las empresas del Estado. No olvidemos que Chile nacionalizó la industria del cobre a principios de los años 70. Teníamos ENAMI ya de décadas anteriores. Pero a eso se sumó el desarrollo de una industria privada de gran envergadura, que mencionaba con este salto de crecimiento de la inversión y de producción en las décadas de los 80-90. Y, por lo tanto, la coexistencia de ambos estamentos permitió que, con la participación del Estado como articulador de esa situación, los beneficios de la sociedad se maximizaran. Si lo pudiera resumir en estos cuatro pilares a la derecha en la lámina, lo leería de abajo hacia arriba. Diría primero que el nacionalismo de recursos naturales existe en Chile y en muchos países. Pero tenemos que decir que en Chile también existe un nacionalismo de recursos naturales que se ha logrado canalizar. Se logró canalizar a través de una gestión exitosa de las empresas del Estado. Estoy hablando del periodo de los 90 hasta probablemente inicios de 2010. Eso aumentó la legitimidad de la industria minera en la sociedad chilena. Además, logró que las rentas y la riqueza fueran más allá de las capacidades iniciales que tenía solamente la empresa estatal. Con eso se logró un desarrollo más amplio y sustentable del país. Yo creo que ese modelo ha sido el pilar sobre el cual se constituyó el éxito del país en los años anteriores.

Déjenme describirles también algunas cuestiones adicionales (Figura 8).

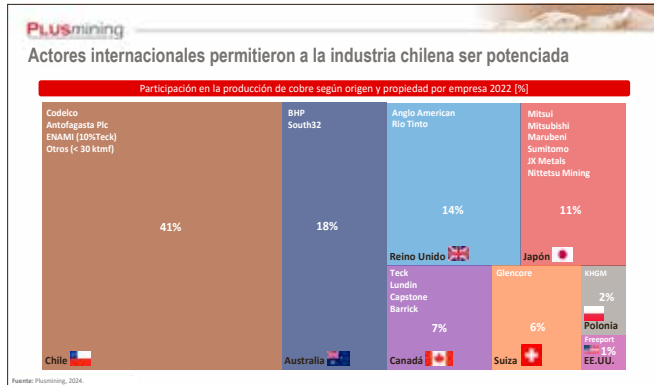


Figura 8

En esta lámina estoy desplegando el origen de la producción de cobre en Chile. ¿Cuáles son las compañías de los países que controlan y operan la producción nacional? Es muy importante decir que Chile tiene del orden del 41% de la producción total del país. Australia del orden del 18%. El Reino Unido, hablemos del orden del 12%. Canadá, 10%. Japón, alrededor de un 11%. Esos son los países que han dado forma al desarrollo de la industria minera, en este caso del cobre. El cobre es muy importante, como todos sabemos, en la minería nacional. Con eso les mostré un mapa para entender quiénes son los jugadores, los países, que están presentes en la minería nacional.

Otro dato muy relevante es lo que Chile logró establecer con este modelo virtuoso (Figura 9).

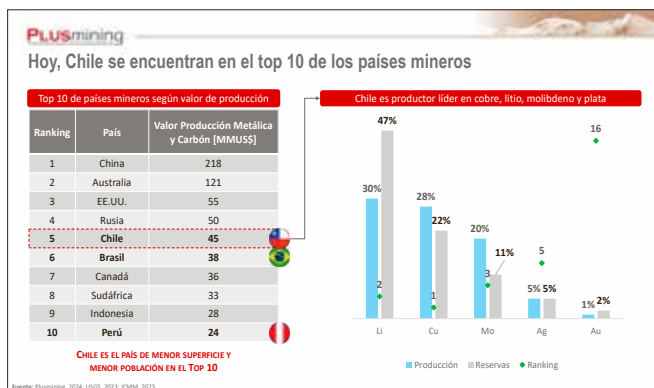


Figura 9

Chile se constituye como el quinto mayor país minero del mundo, si lo medimos como el total del valor de la producción de los países. Es decir, si valorizamos, sumamos y hacemos un ranking de la producción, vemos que China es el país minero más importante del mundo. Siempre se ve a China como consumidor, pero también es un país minero de primera línea. Luego Australia, Estados Unidos, Rusia y Chile en un quinto lugar, superando a Brasil y superando a Perú. Si consideramos el tamaño de los países, podríamos decir que Chile es el país más minero del mundo, porque está en el quinto lugar, pero es el país más pequeño de estos primeros cinco países. Daría para pensar que es una potencia minera muy importante. Tenemos la producción, las reservas, somos segundo productor de litio del mundo, primero de cobre, tercero molibdeno, quinto de plata, decimosexto en oro. Ese es el panorama general.

Algunos datos que no puedo dejar de mencionar para también entender la dimensión de la industria minera en Chile: el PIB (Figura 10).

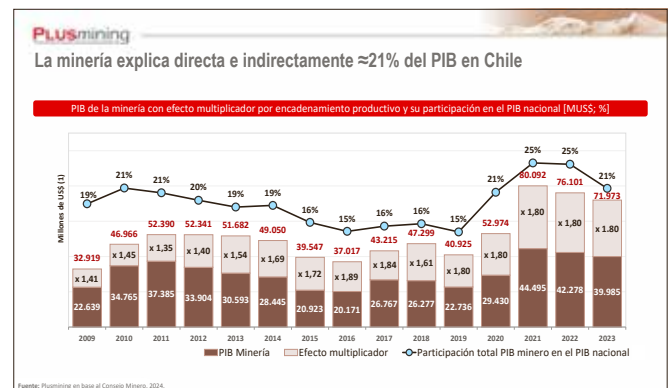


Figura 10

En relación con el PIB, si consideramos además el efecto multiplicador que genera, estamos hablando que la minería explica un 21% en el año 2023, y perfectamente podríamos decir que en un promedio está cerca del 20% del PIB nacional, incluyendo la parte directa y los encadenamientos.

Aporta a los ingresos fiscales directos de la siguiente forma (Figura 11).



Figura 11

Las fluctuaciones son mucho mayores, como pueden ver, pueden ser tan grandes como el 21% de los ingresos fiscales en 2010 en este caso, o tan bajo como el 2% en 2016. Esto dio origen a las políticas de estabilización de los ingresos del cobre, una política muy exitosa, que hay que valorar mucho ya que ha permitido estabilizar el uso de los ingresos de la minería por parte del Estado.

En cuanto a la inversión (Figura 12).

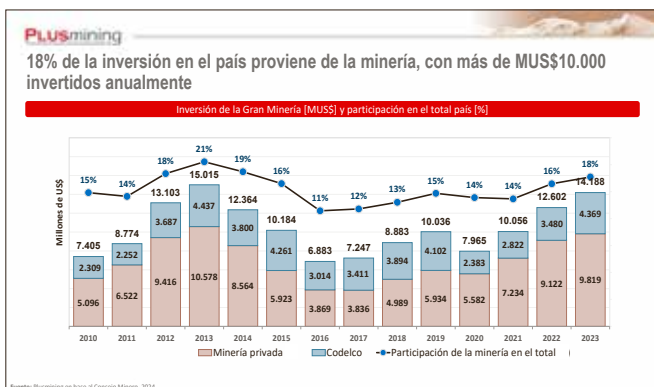


Figura 12

La inversión es del orden del 14-15% en promedio del total del país.

En cuanto a empleo (Figura 13).

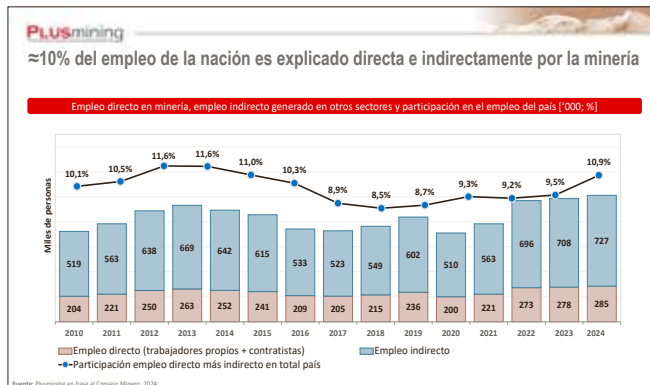


Figura 13

También consideramos el efecto indirecto que no es menor; como pueden ver en el gráfico, de manera directa estamos hablando de 270, 280 mil trabajadores, pero indirectamente esto se multiplica varias veces y significa que el empleo es alrededor de un 10% del total nacional.

Otro factor importante para describir el aporte de la industria minera, es cómo se distribuyen los flujos que la industria minera genera regularmente (Figura 14).

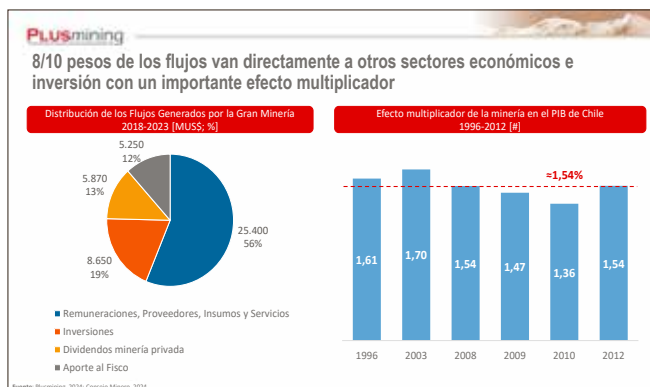


Figura 14

A la izquierda, tenemos la distribución de los flujos del año 2020. Y esto es bien importante porque muchas veces la discusión del aporte de la minería se suele concentrar en los aportes al fisco, en los impuestos, pero resulta que eso es sólo el 6% de los flujos que genera la industria minera. Los dividendos en este caso en 2020 fueron 10%, pero todo el resto fueron inversiones o pagos de remuneraciones, proveedores, insumos, servicios. Por lo tanto, lo que quiero decir en esta lámina es que el 90% del dinero que

genera la industria minera recircula de una manera u otra en la economía nacional. No hay que quedarse sólo con el aporte del fisco, que es muy importante, por supuesto, es un ítem trascendental de lo que se paga en impuestos y ahí ha habido cambios recientes, como todos sabemos, pero hay un volumen de dinero que genera la industria minera que recircula con mucha fuerza en el país.

Bueno, decía también que el cobre ha sido históricamente lo más importante (Figura 15).



Figura 15

Me pareció oportuno explicar cuánto efectivamente es el cobre respecto a otras actividades productivas. Si lo medimos por exportaciones, vean ustedes que, en la minería, el cobre explica 84% del total de las exportaciones mineras del país. Solamente en el último tiempo hemos visto con el alza del precio del litio, este componente ha sido un poco menor, pero en general el cobre sigue siendo el rey de la industria minera.

Anticipé, de cierta manera, esta lámina, pero me parece importante volver a mencionarlo ahora para lo que viene en la presentación (Figura 16).

Uno puede identificar que desde el año 60 hasta la fecha, en la etapa previa a la nacionalización, hubo un crecimiento, pero yo diría que fue más bien lento. Probablemente ese fue uno de los factores que alentó a nacionalizar la industria del cobre. El otro lado va a decir que precisamente las presiones por nacionalizar frenaron la inversión. Ese debate puede ser como el huevo o la gallina. Pero lo que me interesa más es mostrar cómo explotó la producción chilena desde fines de los 80 hasta los años 2000. En ese

periodo, el crecimiento fue extraordinariamente fuerte. Creo que fue uno del boom de inversión más grandes de la historia de la minería moderna en el mundo. Luego, una etapa siguiente donde se produjo una consolidación hasta 2014. No olvidemos que este es el periodo del superciclo, donde los precios estallaron, pero el crecimiento no fue tan acelerado como había sido antes. Y ahora estamos en una etapa más bien de estancamiento con un crecimiento incluso negativo en la producción.

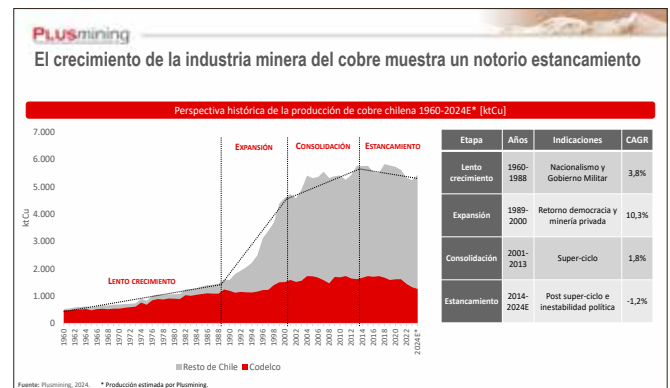


Figura 16

En este gráfico quiero también hacerme cargo de otra cosa que me parece relevante aclarar (Figura 17).

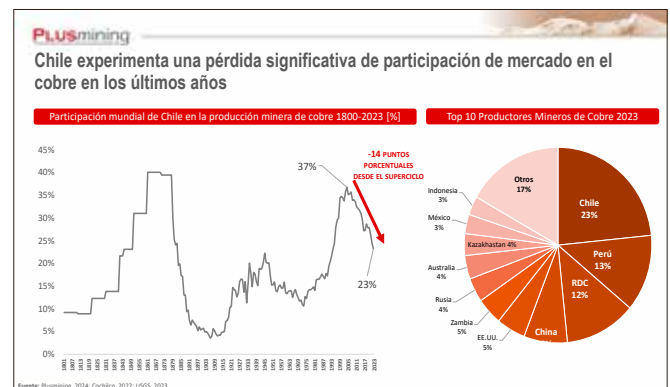


Figura 17

¿Cuál es la participación, vamos a decir, de mercado? ¿Cuál es la participación de Chile en la producción mundial de cobre desde 1800 hasta el año pasado? Esto que veremos a continuación es gracias a unos datos muy interesantes de la Universidad Católica de Chile, que ha recopilado

estadísticas de Chile desde la época colonial. Como pueden ver, las oscilaciones que ha tenido Chile en su producción respecto de la producción mundial han sido enormes. Chile tuvo un 40% de la producción mundial hacia fines del siglo XIX. Pero con la Guerra del Pacífico y la explotación del salitre, se produjo un desplome gigantesco en la producción de cobre en Chile. Esto coincidió con el desarrollo de tecnologías de explotación yacimientos masivos, sobre todo el proceso de flotación desarrollado en Australia y Estados Unidos, que permitió la explotación de yacimientos de menor ley, pero masivos. Luego, Chile se recupera con la llegada de tecnología extranjera. Luego viene esta etapa previa a la nacionalización en que se frena la inversión. Posteriormente, el boom que acabo de describir, y ahora estamos en una fase de caída. Entre fines del año 2000 y hasta ahora, hemos perdido 14 puntos en la producción mundial de cobre. Hoy tenemos el 23% en Chile, Perú el 13%, Congo 12% de la producción mundial.

Esto no solamente ocurre en el cobre (Figura 18).

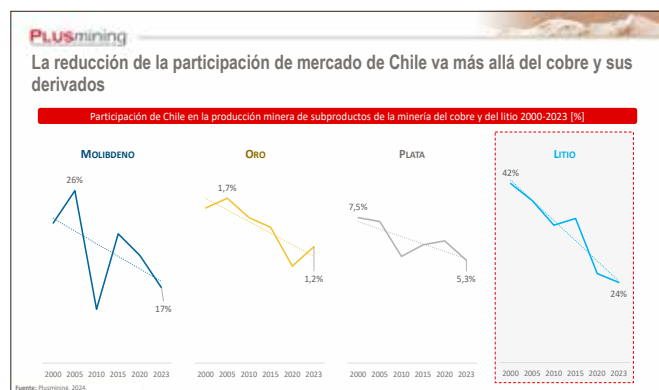


Figura 18

Ha pasado en el molibdeno, en el oro, en la plata, pero en muchos casos estos son subproductos del cobre, así que tampoco es algo que sea tan decisivo. También ocurrió en el litio, ya que Chile, entre el año 2000 y el año pasado, pasó de 42% a 24% en la participación mundial de litio. Por lo tanto, creo que hay un patrón detrás de esta pérdida de participación de mercado minero en el mundo, y de la cual hay que hacerse cargo.

Es lo que voy a intentar explicar en esta sección (Figura 19).



Figura 19

Cuáles son los desafíos. Yo creo que en primer lugar hay desafíos de orden operacional (Figura 20).



Figura 20

La gran expansión minera de los años 90 fue sin duda épica, gigantesca, pero esa inversión ha ido madurando y hoy tenemos un parque antiguo. Puede parecer tal vez extraño decirlo, pero sí, es un parque minero que ya ha entrado en la madurez, por lo tanto, los desafíos y los problemas que hay que resolver van en aumento. Al mismo tiempo, se ha ido haciendo necesario incrementar los estándares ambientales, sociales y de gobernanza para dar cuenta del segundo elemento, los desafíos institucionales y regulatorios. Ha habido cambios en el marco legal y regulatorio en las últimas décadas, y las demandas de las comunidades, de los ambientalistas y ONGs han ido al alza, situación que ha aumentado las presiones sobre la industria.

El desafío cultural está presente, ya que no es tan claro que exista un consenso de que la minería es el motor de desarrollo, y eso también ha ido estableciendo mayores desafíos. El resultado es que tenemos una industria minera que está muy desafiada en el país.

¿Cuáles son algunas de las variables concretas? Probablemente aquí, para los ingenieros que me escuchan, el lenguaje va a ser más familiar (Figura 21).

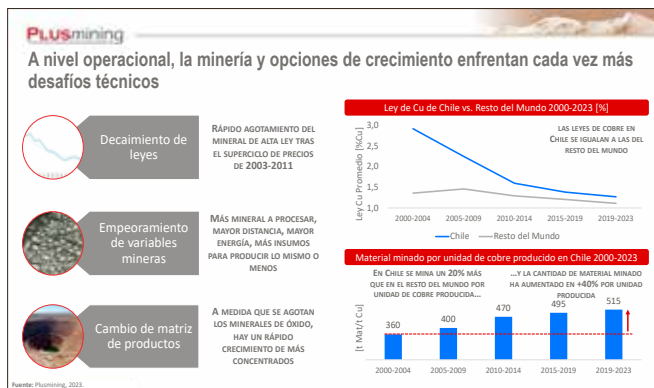


Figura 21

La caída importante de las leyes en Chile, como lo pueden ver en el gráfico. Chile tenía leyes altas del orden de 2,5% a principios de siglo, en los años 2000. Hoy hemos ido convergiendo a la ley del resto del mundo. Es decir, la ventaja geológica, por decirlo de alguna manera, ha ido decreciendo y eso tiene bastantes consecuencias. Las variables mineras como la cantidad de mineral a procesar, las estoy mostrando en el gráfico de abajo. Es necesario minar mucho más material para obtener la misma cantidad de cobre. Mayores distancias de transporte, mayor necesidad de energía, el mineral se va haciendo más duro también, hay mayor necesidad de insumos. Es decir, toda esta situación va generando una nueva realidad.

También hay otra cosa importante. Chile llegó a tener más del 40% de toda la producción de cobre vía óxido, que es la parte superficial de los grandes yacimientos de cobre, que tienen un procesamiento más fácil, y eso se ha ido agotando rápidamente y hoy tenemos más bien la parte inferior de los yacimientos que tiene desafíos más importantes. La cantidad de material minado por unidad producida ha aumentado

40% en este siglo, para dar una idea de lo que significa en volumen esta situación. También existen otros elementos que creo que son muy atingentes para esta conferencia con ustedes y tiene que ver con los proyectos (Figura 22).

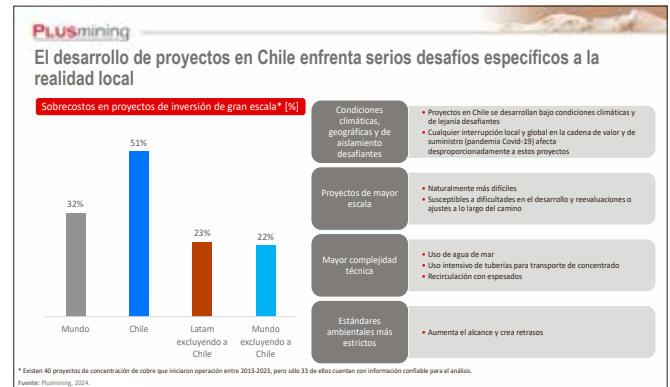


Figura 22

¿Cómo se han ido desarrollando los proyectos? Nosotros en Plusmining realizamos un estudio comparativo y llegamos a la conclusión de que efectivamente desarrollar proyectos en el mundo es difícil. Hay sobrecostos en proyectos mineros del orden del 32%, pero en Chile ese sobrecosto es de mayor magnitud, 51% por encima del promedio en la muestra que utilizamos. Por lo tanto, Chile está por arriba y hay un desafío mayor en materia de materialización de proyectos. ¿Cuáles son las razones? Creo que es un debate abierto aún. Me gustaría mencionar algunos factores.

Los proyectos se han ido desarrollando en ubicaciones cada vez más difíciles, donde las condiciones climáticas son desafiantes. Estoy hablando de la Alta Cordillera. Hay proyectos de mayor complejidad que hay que desarrollar. El aumento de estándares también me parece que ha sido un desafío que no se ha procesado suficientemente bien, o no a la velocidad suficiente para adaptarse a ello.

Tenemos una realidad desafiante en materia de implementación de proyectos.

Por lo tanto, si proyectamos la situación de Chile en materia de producción de cobre, vemos que no hay nuevos proyectos y que la producción del país va a caer 1% en promedio anual (Figura 23).

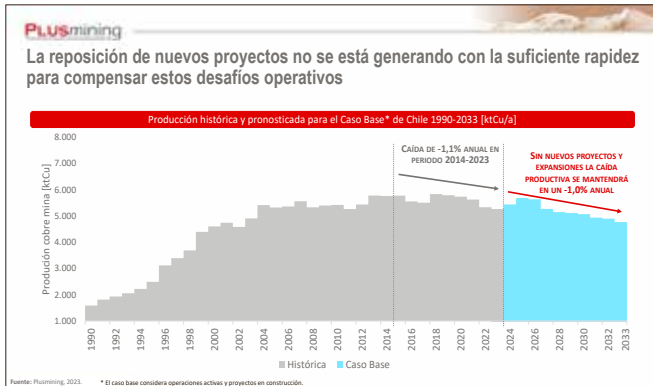


Figura 23

Los proyectos son fundamentales para evitar que continúe la caída de la producción de Chile. Alguien podrá decir que se resuelve haciendo proyectos, pero si vemos la historia entre 2014 y 2023, a pesar de los proyectos que se hicieron, Chile perdió 1,1% de producción anualmente. Esta caída de 1% que proyectamos sin proyectos en etapas de factibilidad, prefactibilidad o anteriores, podría continuar. Dicho de otro modo, la responsabilidad está en cómo desarrollamos el tema de los proyectos de una manera más efectiva.

La competitividad minera del país ha ido retrocediendo como consecuencia de lo que estoy explicando (Figura 24).



Figura 24

Si comparamos el costo de Chile con el del resto del mundo a comienzos de siglo, eran bastante similares. Sin embargo, hoy los costos chilenos, que están en la línea gris, están por arriba del costo de producción del resto del mundo, como resultado obviamente de lo que he estado mencionando.

¿Qué desafíos son los más importantes de abordar? (Figura 25).



Figura 25

Acá es donde se debe poner atención y concentrar las energías, las fuerzas, y congrega voluntades en torno a lo que tenemos que hacer. Primero, hay un tema relevante con la infraestructura. La industria minera chilena ha ido mutando, ha ido cambiando, estructuralmente los yacimientos son más grandes, más complejos. Necesitamos infraestructura que vaya acompañando esa situación, especialmente en transporte, puertos, almacenamiento. En cuanto al tema del agua, eso es un cambio estructural que ya se produjo. El agua continental ya no está disponible y por lo tanto ahora todo proyecto va necesariamente a requerir agua desde el mar, lo que plantea una situación que voy a explicar más adelante, pero ciertamente cambia la estructura de costos de los proyectos. El agua del mar puede significar –versus el agua continental– un incremento de 10 veces su valor, en promedio. Estoy hablando de cuánto cuesta el insumo en sí mismo. Por lo tanto, ese es un cambio importante para abordar.

Si pudiera resumir en algunos factores, ¿qué ha pasado en Chile en las últimas décadas? (Figura 26).

Ha habido cambios regulatorios en materia de propiedad minera que no se abordaron a tiempo, eso lo voy a explicar más en detalle. El tema de aprobación de proyectos entró en una fase de discrecionalidad compleja, la judicialización ha venido acompañada por actores principalmente ambientalistas que han comenzado a intervenir, hay ineficiencia en los tiempos de los permisos ambientales, entre otros. La carga fiscal ha ido aumentando y me parece que en

materia de infraestructura y logística el Estado también ha ido rezagándose. Por lo tanto, aquí están, de cierta manera, los desafíos que se han ido generando.

Ahora, esto reduce la inversión (Figura 27).



Figura 26



Figura 27

En Plusmining hemos monitoreado la inversión minera que es aceptada para tramitación ambiental en el Servicio de Evaluación Ambiental en Chile desde 2015 a la fecha. Y pueden ver una tendencia. Si bien tiene altos y bajos, creo que la inversión que está entrando a evaluación ambiental, ha tenido una tendencia a la baja. No podemos dejar de lado el tema político. No quiero entrar en esta materia de una manera directa o centrarme en ello, pero yo creo que no se puede ignorar. Cuando partió la discusión de una nueva constitución hace 10 años, ya comenzamos a ver una caída en la inversión. En 2019, antes que se produjese el estallido social, hubo una recuperación de la

inversión, pero después y con el proceso constituyente y la pandemia incluidos, tuvimos un impacto muy fuerte en la inversión que se somete a la evaluación. Luego, cuando eso termina, se produce una sola vez el aumento en la inversión minera, sometida a la evaluación ambiental y creo que fue simplemente porque muchos de los que estaban aguantando mientras permanecía la incertidumbre aprovecharon cuando se restablece la normalidad, de cierta manera o aumenta la certidumbre y mandan la inversión a evaluación. Sin embargo, con datos actualizados hasta el 16 de noviembre vemos que este año estamos con una caída importante.

Por lo tanto, esto no nos da demasiado optimismo respecto de cómo estamos tramitando la inversión (Figura 28).

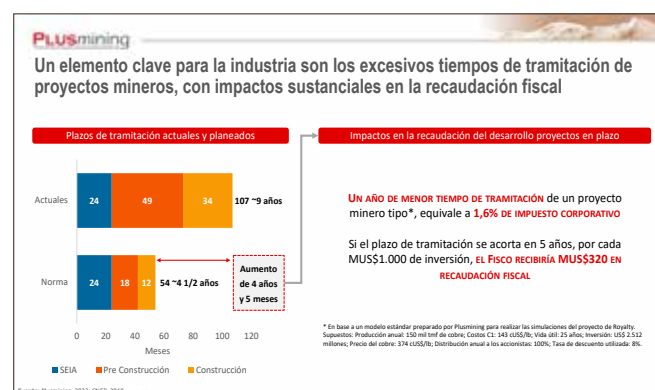


Figura 28

Ciertamente, el tema de la “permisología” ha sido mencionado como uno de los problemas. Nosotros estamos de acuerdo, pero como hemos visto en la presentación, no es el único problema. Si vemos los permisos, hicimos algunos cálculos en base a la Comisión Nacional de Productividad y muestra que, a nivel de permisos, un proyecto no debiera tardarse más de 54 meses en total. Sin embargo, la realidad es que estamos en 107 meses, es decir, nueve años. Eso significa un aumento enorme. Además hicimos un cálculo adicional, un año de menor tiempo de tramitación en un proyecto minero estándar equivale a 1,6% del impuesto corporativo. Por lo tanto, si la tramitación de un proyecto se reduce en cinco años, que es más o menos la brecha actual, por cada mil millones de dólares de inversión el fisco recibiría 320 millones en recaudación fiscal. Es decir, hay un costo de oportunidad enorme que le está significando al país tener esta ineficiencia a nivel de permisos.

Otro elemento que mencioné es el tema tributario (Figura 29).

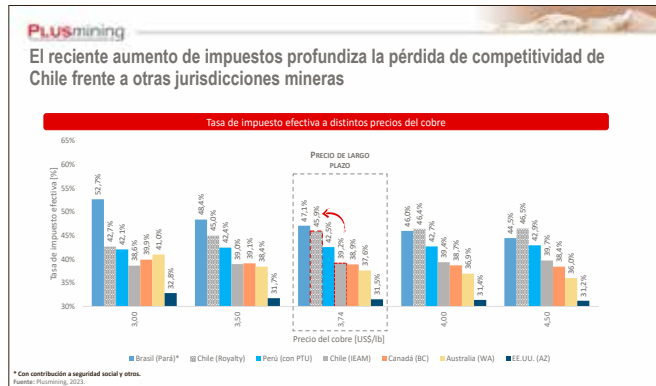


Figura 29

Calculamos también en Plusmining qué significó para Chile el royalty. Teníamos antes en Chile un 39% en promedio de carga tributaria para la minería; con la nueva carga tributaria llegamos prácticamente a 46%. Esto es con un precio de largo plazo del cobre. Hay otros cálculos a la izquierda y a la derecha con otro tipo de precios de cobre, pero en general Chile pasa a ser bastante más caro si lo vemos, por ejemplo, con algunas otras jurisdicciones mineras en Canadá (la barra naranja), en Australia (amarilla), Arizona y Estados Unidos. Quedamos por encima, y bastante por encima de eso y también de Perú. Por lo tanto, hay una tendencia compleja.

Otro tema es la exploración (Figura 30).



Figura 30

La exploración minera es una inversión de riesgo, por lo tanto, muy sensible al riesgo político. Y aquí también hay una caída muy fuerte. Chile ahora ocupa el puesto 49 y es el país con mayor aumento en la percepción de riesgo político para la exploración minera entre 2018 y 2023. Pueden ver que Chile estaba abajo y mientras más abajo, mejor, pero ahora pasó a la parte superior, la riesgosa. Brasil y Argentina están en niveles más bajos.

Eso es importante porque la oportunidad que ofrece actualmente la transición energética es muy evidente (Figura 31).

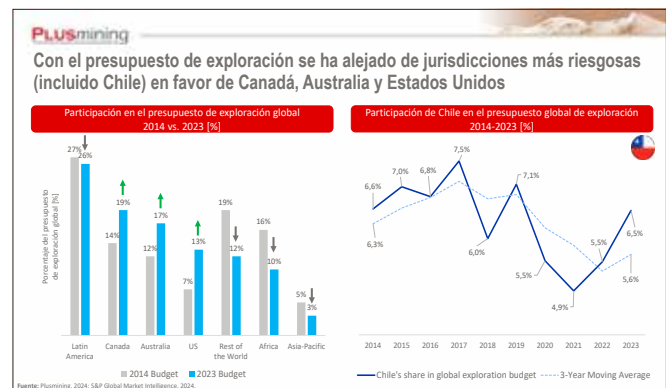


Figura 31

El gasto en exploración en países como Canadá, Australia, Estados Unidos ha aumentado entre 2014 y 2023 ¿por qué?, porque han podido ofrecer estabilidad, la que lamentablemente en América Latina, África y otras regiones no se ha podido ofrecer. Vemos que Chile se ha ido recuperando los dos últimos años, pero si vemos la película completa ha habido una caída en el monto de la exploración en el país. Esa es la oportunidad que no estamos aprovechando. Chile podría perfectamente estar aumentando sus tasas de exploración como los tiempos aconsejan.

Personalmente, he dado esta batalla, como le consta a Ricardo Nicolau del Roure (Figura 32).

Lo hemos hablado muchas veces, yo me siento como el Quijote dando una pelea más cultural, más de ideas, no dejar la cancha a los agoreros del extractivismo, porque realmente es muy débil su sustento ideológico y, por el contrario, hay que reivindicar al desarrollo sustentable, porque es el camino que corresponde para crecer.

Acá tenemos el contraste (Figura 33).



Figura 32



Figura 33

La visión extractivista busca un cambio de la dirección de las políticas económicas de bastante envergadura, busca que las industrias de recursos naturales queden supeditadas a las políticas industriales. El ejemplo del litio lo refleja muy bien. ¿Cuánto tiempo se ha perdido con la historia de que hagamos baterías? Y mientras pasa el tiempo con esa quimera, la producción de litio ha aumentado mucho menos de lo que podría en nuestro país. Yo creo que es un buen ejemplo de esa situación (Figura 34).

Acá nuevamente la oportunidad que tenemos en América Latina (Figura 35).

Se refleja acá la pelea geopolítica actual en el caso de los minerales cobalto, litio, cobre, níquel, bauxita, grafito, tierras raras, hierro.



Figura 34



Figura 35

¿Cuánto de estos minerales críticos están en los bloques actualmente en disputa? Estoy refiriendo al bloque occidental encabezado por Estados Unidos, que es la barra azul. En el caso del Cobalto, 22% control, Litio, 30% control, Cobre 21% control. Versus lo que es el bloque de China-Rusia, que tiene estos porcentajes en rojo en cuanto a control. Las Tierras Raras son fuertes en cuanto a control del bloque rojo. Queda el bloque verde que corresponde a los países mineros top, que tienen un potencial minero importante y que podrían aprovechar este gran interés por los minerales críticos.

La oportunidad es gigantesca. El cuadro de la izquierda es de la Agencia Internacional de Energía (Figura 36).

Acá están varios de los minerales críticos, como pueden ver en la lista. A la izquierda, se enumeran todas las actividades donde los minerales críticos son cruciales. Tenemos el desarrollo de la energía eólica, de la energía solar, entre otras. Es interesante que el cobre sea el único mineral que

marca en todas las casillas. Eso quiere decir que todas las actividades críticas para la transición energética requieren cobre. En contraste con el litio, que es importante para el almacenamiento de energía, pero no es importante para el resto de las actividades económicas. En América Latina se encuentra el 30% de las reservas de minerales críticos del mundo, aunque el 15% de la superficie terrestre corresponda al subcontinente Latinoamericano. Por lo tanto, hay una proporción mayor de recursos críticos de lo que es el propio territorio de América Latina. Esa es la oportunidad.

El portafolio de inversión de proyectos de cobre en Chile alcanza US\$84 mil millones (Figura 37).

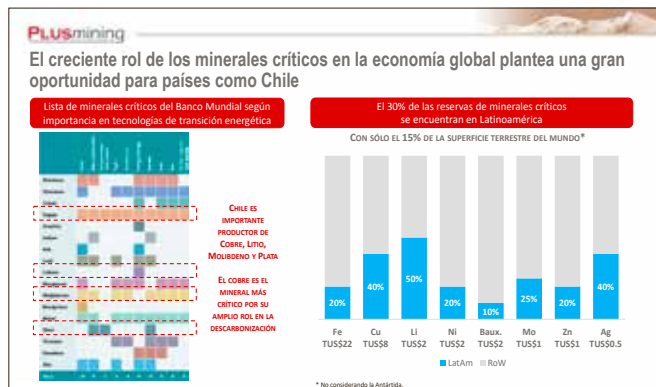


Figura 36

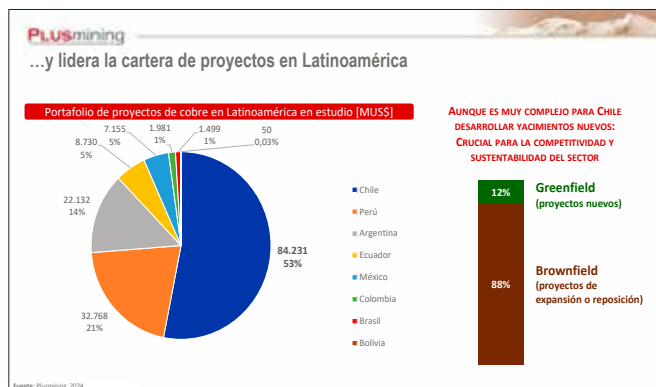


Figura 37

¿Cuál es el problema? El problema es lo que explica el gráfico a la derecha, que el 88% de estas inversiones son para mantener el negocio, no son proyectos nuevos. Solamente un 12% son proyectos nuevos que nos permitirían aprovechar mejor esta oportunidad.

Chile tiene oportunidades que deberíamos saber explotar, transformar estos desafíos en oportunidades. Es el título de esta lámina (Figura 38).



Figura 38

En esta lamina hemos definido dónde están las prioridades de innovación en la minería. Acá está dividido en rajo abierto, mina subterránea y en la parte del procesamiento, vemos que en la lixiviación de sulfuros primarios hay una oportunidad enorme donde Chile está jugando un rol importante.

Este gráfico muestra el total de recursos que hay en la producción minera actual (Figura 39).



Figura 39

Es una fracción muy pequeña de todo el volumen de recursos que existe. Además, vemos la evolución que ha tenido, en este gráfico (Figura 40).

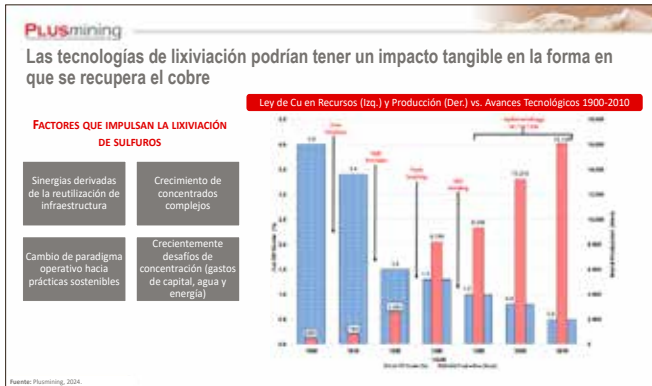


Figura 40

¿Cómo desde comienzos del siglo XX, la cantidad de cobre que es la barra roja ha ido aumentando significativamente a pesar de que la ley ha ido cayendo? A principios del siglo XX, en el año 1900, la ley promedio era de 4%, pero se producían 450.000 toneladas de cobre.

Eso sucedió en la medida que fueron ocurriendo quiebres tecnológicos importantes como la flotación, el procesamiento de alto volumen en los molinos SAG, entre otros. Eso ha permitido un procesamiento mayor y un aumento de la producción a pesar de la caída de la ley. Ese camino es el que tenemos que recorrer. Y la hidrometalurgia es la que está, me parece, más avanzada, dominando los posibles quiebres tecnológicos y donde Chile tiene una posición significativa a escala internacional.

El camino de la internacionalización de nuestras empresas es también fundamental (Figura 41).

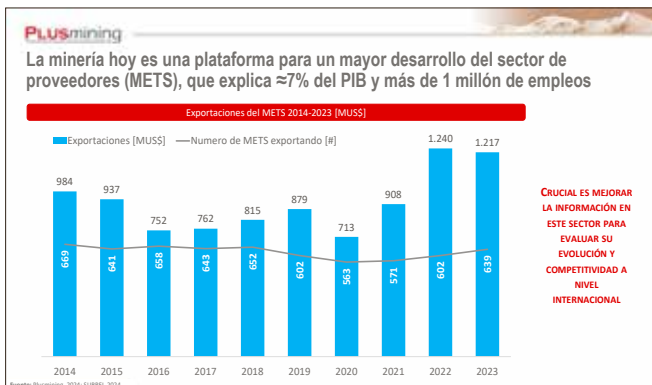


Figura 41

Esta es una estadística de la Subsecretaría de Relaciones Internacionales que presenta las exportaciones de nuestras METS, una terminología australiana que se usa internacionalmente para describir empresas proveedoras de la minería que se consideran exportadoras, innovadoras. Habla de que hay un aumento en la cantidad de empresas y en la cantidad de montos exportados, sugiriendo que tenemos un desempeño positivo.

Nosotros hacemos un llamado a que se mejoren estas estadísticas, porque tenemos la impresión de que estas cifras consideran simplemente todas las empresas que exportan y que son proveedoras, pero en ello hay muchas empresas que son subsidiarias de algunas internacionales. Creo que hay que hacer un refinamiento mayor en las estadísticas para realmente monitorear dónde se está generando el desarrollo de estas empresas proveedoras, innovadoras de la mano de la industria que son clave para poder avanzar.

Por último, quiero mencionar una analogía entre lo que fue el desarrollo de la red de energía en el país con lo que está ocurriendo con el agua, pensando en el rol que la minería puede jugar (Figura 42).



Figura 42

La red eléctrica en el norte de Chile se fue consolidando de la mano del desarrollo de la minería y eso permitió dar luz a un sistema integrado en el norte. Hoy tenemos un fuerte desarrollo de la industria de la energía renovable que gracias a la demanda de la minería ha tenido un desarrollo acelerado. Esperemos que eso termine llegando y beneficiando a todo el país a través de las redes de distribución. Esas inversiones se encuentran frenadas por largos procesos de inversión, permisos y conflictos, entre otros.

Actualmente, en minería hay un aumento muy fuerte del uso del agua de mar que está generando una potencial red de agua para el norte del país que podría transformar el norte de nuestro territorio. Imaginen lo que podría significar que toda esta red se interrelacione y gracias a una energía barata, logre reducir costos de bombeo y de distribución para la producción de otro tipo de actividades económicas. Esa es una gran oportunidad que tiene Chile de la mano de la minería y que me parece que no podemos dejar de tener muy presente (Figura 43).



Figura 43

Creo que el desarrollo de los países con recursos naturales no tiene un rumbo predeterminado, no está garantizado (Figura 44).

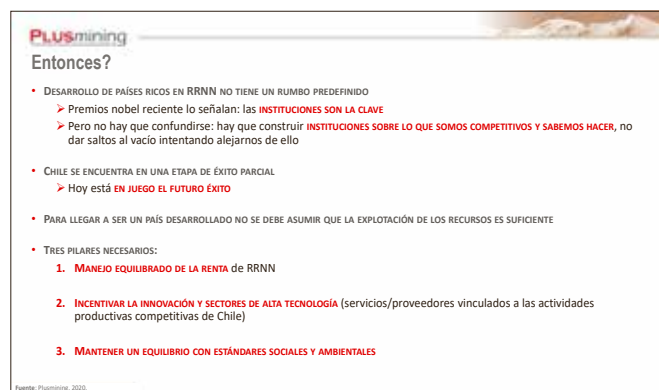


Figura 44

Por lo tanto, tampoco para los que somos mineros de corazón, tampoco podemos pensar que la minería tiene la carrera ganada. Los recientes premios Nobel Acemoglu, Robinson

y otros, lo dicen muy claramente: las instituciones son la clave. Ahí es donde no hay que perderse, porque tenemos que construir y solidificar instituciones sobre la base de aquello en lo que somos realmente competitivos, que es la minería y otras actividades de recursos naturales. No desviarnos con los cantos de sirena de que tenemos que alejarnos de la actividad minera para empezar a producir otros bienes en los cuales no tenemos ventajas competitivas o nos vamos a demorar mucho tiempo poder desarrollar. Es al revés. Tenemos que aprovechar donde somos competitivos para desarrollarnos a partir de ahí.

Los problemas de la industria minera actual son una gran oportunidad. Todos los problemas que hay que resolver de las bajas de ley, del uso del agua, conexión de la energía barata, transporte, todo eso son oportunidades para que empresas chilenas, universidades chilenas, se conecten, busquen las soluciones y las conviertan en industrias, en empresas competitivas a nivel internacional. Me parece que estamos en un momento crucial, el futuro está en juego, tenemos que ganar esta batalla cultural.

Quiero dejar algunos mensajes bien concretos de lo que creo que tiene que hacer Chile en este momento (Figura 45).

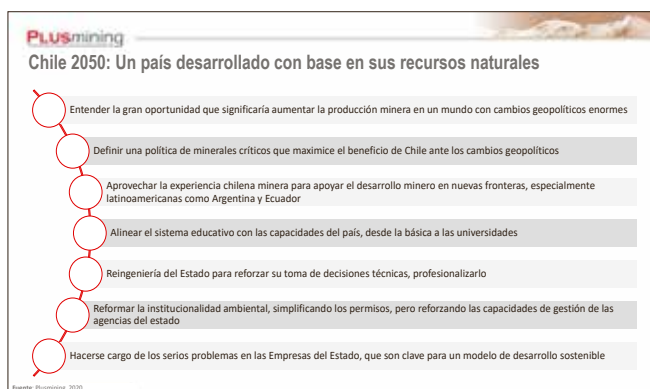


Figura 45

Primero, hay una oportunidad enorme que en Chile no se está procesando suficientemente bien. Este cambio hacia la transición energética va a requerir más minerales y para eso tenemos que hacer más minería y destrabar el camino para eso. No tenemos una política de minerales críticos. ¿Por qué no tenemos una política de minerales críticos en Chile? Australia la tiene, todos los países consumidores la

tienen, Canadá la tiene. ¿Por qué nosotros no pensamos como país, cómo aprovechar esta oportunidad a través de una política integral? Otra cosa que me parece importante es aprovechar la experiencia minera chilena para apoyar el desarrollo de otros países. Van a ocurrir cosas en Argentina, tenemos que estar presentes en Ecuador y en otros países más. El sistema educativo chileno está muy desconectado de las necesidades de la minería, desde la educación básica hasta las universidades y se debe alinear mucho mejor. El Estado necesita una reingeniería enorme, se necesita profesionalizar. No estoy diciendo que hay que hacer lo mismo, pero uno ve que, en países como Argentina, con el presidente Milei, ahora en Estados Unidos, con los anuncios de Trump, se están planteando temas de regulación, temas de reducción del Estado o simplificación del tema de permisos. Estaba escuchando algunos programas recientemente y en Europa se están dando cuenta de que con los cambios que están ocurriendo no pueden seguir apostando a quedar entre Estados Unidos y China. Europa está llena de regulaciones, de beneficios sociales, pero si no mejoran su competitividad, les van a pasar por encima Estados Unidos y China.

También propongo que la institucionalidad ambiental tenga un cambio muy sustantivo. Me animo a pensar que la institucionalidad ambiental tiene que ser profesional, no política. Tiene que haber una instancia política en algún momento inicial de la evaluación de un proyecto, pero de ahí en adelante tiene que ser profesional. Por último, no hay que olvidar que las empresas mineras del Estado que son importantes para el modelo integrado que mencioné anteriormente tienen que ser efectivas. Sin ellas va a ser difícil, va a quedar el campo abierto para el nacionalismo de recursos y probablemente no vamos a poder desarrollar todas las potencialidades que tiene la industria minera en el país. Las empresas del Estado, CODELCO, ENAMI, están atravesando momentos difíciles y hay que ver cómo enfrentarlos.

Plusmining va a cumplir 10 años en este tipo de pensamientos y reflexiones, así que espero que hayan podido disfrutar de esta presentación y muy atentos a sus comentarios y preguntas (Figura 46).

Muchas gracias.



Figura 46

A continuación de la conferencia, el Sr. Guajardo responde a los asistentes consultas y comentarios.

Sr. Hernán Urra.

—Según las estimaciones de la Corporación de Bienes Capital, para el próximo quinquenio va a haber un importante crecimiento en la inversión minera en Chile y eso no coincide con lo expuesto en esta presentación. Si puedes hacer algún comentario.

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Creo que sí coincide. De hecho, mencioné que el monto de inversión en Chile es de 84.000 millones de dólares. El problema que yo planteo no es la falta de inversión. El problema que yo planteo es que la inversión es simplemente para mantener nuestro parque industrial minero, no es para crecer. Tenemos un problema de nuevos proyectos que aumenten la capacidad productiva. Es ahí donde veo la dificultad. Y el segundo problema que veo, es que la inversión que es enviada para evaluación ambiental, que de cierta manera es un *leading indicator* de que viene más adelante, también se ha ido debilitando en los últimos años. Esos son los problemas que veo, pero para un parque industrial, somos el quinto país minero más grande del mundo y tiene que haber mucha inversión para poder mantenerse competitivo.

Sr. Francisco Miranda.

—Chile vende mucho mineral crudo al mundo, pero no hay una venta de tecnologías, maquinaria o servicios de ingeniería. Entonces, ¿qué se está haciendo para mejorar esta exportación de conocimiento?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Hay algunos segmentos donde estamos avanzando bien en el desarrollo de empresas chilenas proveedoras de bienes y servicios. En el tema de investigación sobre la lixiviación de sulfuros primarios, Chile está con una posición competitiva muy fuerte, hay investigación interesante y está llegando a la fase comercial. Me parece que ahí hay un ejemplo interesante, pero en otras cosas no hay un avance muy sustantivo. Tenemos más bien casos aislados. En la presentación mencionaba que es muy importante que haya una buena medición de qué es lo que efectivamente está ocurriendo, cuáles son las empresas que están vinculándose, prestando servicios, vendiéndole bienes a la industria minera, cuáles son los impulsos capaces de exportar. Las estadísticas no nos están acompañando suficientemente para poder entender el fenómeno y poder saber a qué atenernos.

Sr. Germán Millán Valdés.

—Respecto a la competitividad real de nuestras empresas para salir del país. Si SQM está en Australia y AMSA está dando pasos en Perú, ¿no debería estar CODELCO expandiendo sus capacidades para minar cobre fuera de Chile? ¿Qué pasa con los proveedores nacionales?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Es una pregunta clave. ¿Cómo romper esta barrera del ingreso medio, la trampa del ingreso medio? Un elemento clave es la internacionalización de las empresas. ¿Cómo las empresas nacionales logran ir afuera de manera competitiva? Porque eso arrastra una serie de actores de la economía nacional. El ejemplo es BHP. Una empresa australiana que permite que muchos proveedores australianos también

vayan de la mano con su presencia en algunos otros países. En ese sentido estoy de acuerdo que Antofagasta y SQM estén dando los primeros pasos. Lo han intentado antes, pero esta vez están dando pasos más sustantivos que van a permitir que este proceso se inicie a una escala mayor y eso es auspicioso. Ahora, si lo debe hacer CODELCO, necesita un análisis más especial. CODELCO tiene demasiados desafíos que atender en Chile en este minuto. Estoy bastante preocupado por lo que está ocurriendo con los proyectos estructurales, por lo tanto, preferiría que al menos en los próximos años, el foco se concentre en sacar adelante muy bien los proyectos antes de pensar en una estrategia de internacionalización que eventualmente puede tener sentido con lo que está pasando en Argentina, en Ecuador, en otros lugares. Hay una experiencia, sin duda, pero primero resolvamos la situación en casa. Respecto a los proveedores, lo comenté en las respuestas anteriores.

Sra. Claudia Rodríguez.

—En este escenario, ¿cómo ves la irrupción de la República Democrática del Congo?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Bueno, el Congo, junto con Zambia, han sido históricamente actores de primera línea en producción de cobre. No olvidemos que incluso se llegó a constituir un cártel entre Perú, Chile, Zambia y Zaire en ese entonces. Eso fue el CIPEC. Siempre ha sido una zona muy rica en producción, pero estuvo muy frenada por una serie de problemas políticos, precisamente. La producción en el Congo estuvo detenida, la inversión también estuvo detenida. Ahora, dada esta gran oportunidad de la transición energética, se está produciendo una revalorización de lo que se puede hacer en el Congo. Kamo-a-Kaluka es el mejor proyecto de cobre que se ha inaugurado en los últimos cinco años y se hizo en el Congo. Por lo tanto, yo no subestimaría el potencial que tiene ese país. Tiene, por supuesto, grandes riesgos políticos, pero este ejemplo puede ser algo muy significativo.

Sr. Martin Colil.

—Con la demanda creciente de cobre para electrificación y electromovilidad ¿existe un riesgo de sustitución de cobre en el mediano y largo plazo? ¿Se visualiza la consolidación y apertura de empresas de servicio de alta tecnología para la minería mundial desde Chile?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—El tema de la sustitución es complejo, porque, dado todos los problemas que estamos viendo para desarrollar proyectos, los consumidores de cobre aguas abajo se están poniendo muy nerviosos. Tienen precios sobre cuatro dólares y, además, se les dice que no va a haber proyectos. Por lo tanto, sí, ha habido intentos por sustituir. Esta es una batalla permanente. No quiero tampoco ser demasiado alarmista en esto, porque el tema de sustituir el cobre por otros minerales es una cuestión que está en el tapete y es una batalla del día a día. Sin embargo, es cierto que, en los últimos años, por ejemplo, se empieza a ver más interés de algunos productores de aire acondicionado, por ejemplo, de probar aleaciones nuevas de aluminio que puedan reemplazar al cobre. Es una preocupación muy válida y que no hay que perder de vista.

Esto de los altos precios del cobre no es una avenida de un solo sentido. También tenemos que pensar que esto tiene que balancearse con mantenernos competitivos en el largo plazo, y eso significa poder dar garantías a todos los consumidores de cobre de que va a haber cobre.

La segunda pregunta no sabría muy bien cómo contestarla. Hay algunos ejemplos positivos donde empresas chilenas están siendo competitivas a nivel internacional, pero no me parece que sea un fenómeno tan masivo todavía. Por lo tanto, creo que hay casos esporádicos, pero no una situación más masiva de desarrollo de proveedores competitivos a nivel internacional desde Chile.

Sr. Oscar Villarroel.

—¿Cómo debiera intervenir el Estado y qué mecanismos propones para generar una política de educación para crear profesionales para la minería del futuro?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Al tema educacional le asigno mucha importancia, porque si no tenemos una población que entienda lo que es la minería de manera realista, va a ser muy difícil que podamos enfrentar estos desafíos y aprovechar las oportunidades. Soy bien ambicioso en ese sentido, creo que el currículum nacional que se enseña en los colegios debería tener contenido minero. Los chilenos deberían entender qué significa la industria minera, desde niños. Las futuras autoridades del Ministerio de Educación y el Ministerio de Minería podrían ir conversando e incorporar en el contenido explicaciones realistas sobre la industria minera, para evitar los mitos como que la minería se hace con el chuzo y la pala, por ejemplo, que se aleja de la visión de una actividad industrial. Hay mucho trabajo que hacer. En las universidades yo también veo desafíos enormes. En mi experiencia personal me ha tocado ver la realidad de otros países, como Australia, y es notable cómo se generan empresas a partir de las universidades. Y eso se produce porque las universidades participan, junto con el Estado y con las empresas, en unidades de resolución de problemas. Las empresas van a una instancia preestablecida donde señalan un problema y plantean ¿qué pueden hacer ustedes? Entonces, las capacidades de investigación se aplican a eso y en este escenario puede salir una empresa, que después venda servicios afuera. Nuestro sistema no es tan efectivo en conectar la realidad nacional con las capacidades de investigación a nivel universitario y posuniversitario.

Sr. Andrés Aguirre.

—En base a tu visión de China de la economía mundial, de lo difícil de desarrollar proyectos, la transición energética, ¿cómo se proyecta el precio del cobre para los próximos cinco años?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Estuve en China la semana pasada, y volví con menos aprehensiones de las que probablemente se forma uno como observador externo. China sigue muy pujante. Por cierto, hay problemas, pero uno ve un país que está en marcha y con mucha fuerza. Es cierto, la oferta está desilusionando, la capacidad de crecer está desilusionando, por lo tanto, los desbalances que se prevén para el mercado del cobre son

grandes. Va a haber déficit de cobre y eso inevitablemente va a significar precios más elevados. Sí, va a ser bueno que tengamos precios altos, yo creo que va a ser así, pero no nos vayamos a pasar al punto de que comprometamos la demanda de la próxima década con mayor sustitución y, por lo tanto, menor consumo de cobre. Ese equilibrio tenemos que procurarlo de alguna forma. No nos quedemos solo con la buena expectativa de precios, que siempre es bienvenida, pero hay otra historia que puede ocurrir si vamos demasiado lejos.

Sr. Christian Larrondo.

—¿Qué se puede hacer para evitar el enorme desvío en costos que tienen los proyectos mineros?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Esa es una pregunta muy importante y compleja. Creo que hay que reforzar el tema de las capacidades de generación de profesionales como punto de partida, reforzar la cantidad y calidad de profesionales dado que las demandas no están siendo completamente satisfechas.

También se requiere mayor coordinación entre las empresas de ingeniería y las empresas mandantes del proyecto para mejorar los engranajes que permitan alinear el desarrollo de los proyectos. Además, incide el apresuramiento que surge en torno a algunos proyectos por parte de los inversionistas e influye negativamente. Este es un tema de gran trascendencia y con muchas complejidades, por lo que requiere mayor discusión y debate.

Sr. Hernán Cuadro – Sr. Christian Larrondo.

—Con relación a la necesidad de aumentar la capacidad de fusión de concentrado de cobre en Chile, ¿Es irreversible la situación actual de fundición en Chile?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Considero que el avance de la hidrometalurgia es un factor que a veces se ignora en esta discusión. Existen avances interesantes en hidrometalurgia que van a ir haciendo este camino viable y podría disminuir la dependencia de la pirometalurgia a nivel de tendencias. Sin embargo, la capacidad de fundición instalada a nivel internacional, en países como China dificulta el espacio para capacidad de fundición en países como Chile. El tema geopolítico está acelerando el desarrollo de fundiciones, principalmente en Asia, para evitar las sanciones del mundo occidental sobre el mundo asiático y eso está dando luz a fundiciones en Kazajistán, Uzbekistán y en Rusia. Por lo tanto, desde el punto de vista del espacio que queda para construir fundiciones, lo veo limitado. De hecho, los cargos de tratamiento y refinación, que es el precio que cobran las fundiciones por procesar el concentrado, está al mínimo histórico. Las últimas negociaciones que ocurrieron en Shanghai hace unas semanas atrás, hablaban de valores que estaban bajo el punto de equilibrio de varias fundiciones en China. Por lo tanto, la situación de mercado se ve muy compleja. Ahora bien, también existe un factor geopolítico que no se puede ignorar y es que Chile como mayor productor de cobre del mundo no puede quedar expuesto a una situación de dependencia de otros países procesadores.

Chile debe mantener una capacidad de fundición suficiente, para disuadir cualquier eventual intento de aprovechamiento de una condición de dependencia. Eso significa mantener una cierta capacidad de fundición, la cual debe ser eficiente. Desde el punto de vista comercial no le veo sentido, pero desde el punto de vista geopolítico considero que existe un espacio que se debe preservar. Pero esto implicaría un esfuerzo importante por mantener la eficiencia en nuestra capacidad de fundición.

Sr. Rodrigo Rivas.

—Respecto a la permisología ¿Crees que se está haciendo lo necesario para reducir los plazos? ¿Cómo ves la disposición de los distintos Gobiernos al respecto?

Sr. Juan Carlos Guajardo.

—Valoro primero que se hayan presentado estos proyectos de ley que están intentando reducir en un 30% los tiempos de procesamiento de los permisos. Considerando el avance legislativo, parece haber una mayoría que entiende que hay que hacer algo. Sin embargo, cada vez me convengo más de que eso va a ser insuficiente. La magnitud del problema es mucho mayor de lo que estos proyectos de ley van a permitir hacer. Por eso que en mis últimas láminas mencionaba que necesitamos cambios más profundos. Realmente una reforma al Estado profunda que profesionalice el tema, que limite el factor ideológico, los caudillismos políticos a nivel regional, activistas políticos dentro de las agencias del Estado. Eso de cierta forma atrapa, retrasa el proceso

de permisos. Las reformas podrían mejorar, y bienvenidas sean, pero necesitamos algo más profundo.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Quiero agradecerte en nombre del Instituto tu disposición y a todos los asistentes que se han quedado hasta el final a escuchar las preguntas. Ha sido una presentación muy interesante. Que tengan un buen día.

Muchas gracias.

Fin de la conferencia.

DESARROLLO DE TECNOLOGÍA DE VANGUARDIA PARA LA ASTRONOMÍA GLOBAL

Nuevas oportunidades para la ingeniería nacional.
Ejemplos de proyectos exitosos

Conferencias de los Sres. Ricardo Finger, Profesor Asociado del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile, y Francisco Förster, Profesor Titular de la Universidad de Chile.



Sr. Ricardo Finger.



Sr. Francisco Förster.

El día jueves 7 de noviembre de 2024, vía zoom, y ante una gran asistencia, se realizó la conferencia “Desarrollo de Tecnología de Vanguardia para la Astronomía Global”. En la ocasión los expositores invitados fueron los Sres. Ricardo Finger, quien expuso sobre el tema “Instrumentación astronómica y transferencia tecnológica”, y Francisco Förster, con el tema “ALeRCE: El Broker Astronómico Chileno”.

Ricardo Finger Camus es Ingeniero Civil Eléctrico, Doctor en Ingeniería Eléctrica y Licenciado en Física de la Universidad de Chile. Actualmente, Profesor Asociado en el Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile. Su principal área de investigación es la Instrumentación Astronómica, en particular, el desarrollo de receptores de radio y procesadores digitales de señales para Radio-Astronomía. Ha trabajado en USA, Suecia, Reino Unido y en el Observatorio ALMA en Chile, en el diseño, integración y verificación de receptores criogénicos de altas frecuencias. El Dr. Finger dicta los cursos de Astronomía Experimental, Sistemas Digitales, y Antenas; y lidera los esfuerzos de transferencia tecnológica del Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA).

Francisco Förster Burón es profesor titular de la Universidad de Chile y académico de la Iniciativa de Datos e Inteligencia Artificial (IDIA) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la misma universidad, director del Instituto Milenio de Astrofísica (MAS), Investigador Asociado del Centro de Modelamiento Matemático (CMM) e Investigador Asociado del Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA). Realizó sus estudios de pregrado en Astronomía e Ingeniería Civil en la Universidad de Chile (2004) y un doctorado en la Universidad de Oxford (2009) estudiando los progenitores de supernovas de tipo Ia. Lideró la instalación de un telescopio robótico en Cerro Tololo (CTIO) en 2011, el proyecto High Cadence Transient Survey (HiTS) entre 2012 y 2018 que fue pionero en la detección de supernovas en tiempo real usando la cámara Dark Energy Camera (DECam), y el proyecto ALeRCE entre 2019 y 2024, un broker astronómico seleccionado como broker comunitario para el observatorio Vera C. Rubin y que está en la interfaz entre ciencia de datos, inteligencia artificial y astronomía para filtrar decenas de millones de alertas por noche generadas por el observatorio Rubin.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente.

—Muy buenos días, como presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, quiero agradecer en primer lugar a Miguel Ropert, director del Instituto y fanático de la Astronomía, a nuestros invitados: Ricardo Finger Camus y Francisco Förster Burón por presentarnos el resultado de su trabajo y a todos ustedes por asistir a la conferencia: **“Desarrollo de tecnología de vanguardia para la astronomía global. Nuevas oportunidades para la ingeniería nacional. Ejemplos de proyectos exitosos”**.

El Instituto de Ingenieros de Chile es una corporación sin fines de lucro que desde hace 135 años se ocupa de hacer aportes a la excelencia de la ingeniería, a su enseñanza y al desarrollo del país.

Es en este contexto que periódicamente realizamos Foros, Seminarios o Charlas, sobre temas que, por su relevancia para el país, requieren ser expuestos ante la comunidad.

Chile, con su privilegiada ubicación y condiciones climáticas excepcionales, es reconocido hoy como la capital mundial de la observación astronómica.

Este hecho trasciende la astronomía y representa una nueva oportunidad para el desarrollo de tecnología de vanguardia, para la astronomía global y la creación de emprendimientos de base científico tecnológica que, además de beneficiar a la comunidad científica, impulsen el desarrollo tecnológico y económico del país.

La creación de estas empresas, intensivas en conocimiento, es necesaria para el desarrollo económico y sostenible del país, al permitirnos realizar desarrollos en áreas en las que la ingeniería no ha estado presente, crear nuevas fuentes de empleos de alta calificación, fomentar la innovación, promover la transferencia tecnológica y formar capital humano avanzado.

En esta conferencia, escucharemos en primer lugar una presentación de Ricardo Finger Camus, titulada Instrumentación astronómica y transferencia tecnológica. En ella, Ricardo se referirá al proyecto de Diseño y construcción del sistema óptico receptor de la Banda 1 del Observatorio ALMA y al desarrollo de lentes para Banda 2. Ambos desarrollos de frontera en el ámbito de la instrumentación astronómica.

Posteriormente, escucharemos una presentación de Francisco Förster Burón, titulada: “ALeRCE: El Broker Astronómico Chileno”. En ella, Francisco nos mostrará el trabajo que está realizando con su equipo para procesar el gran volumen de datos que generará el telescopio Vera Rubin que, al combinar técnicas de astronomía y big data, revolucionará nuestra comprensión del universo.

Al término de las presentaciones tendremos espacio para preguntas, las que pueden realizar a través del ícono Q&A de la plataforma.

Queremos expresar nuestro agradecimiento a REUNA que hace posible esta Conferencia ya que sin ella no podríamos disfrutar de esta conversación.

Nuestro director, don Miguel Ropert, al final de las exposiciones moderará las preguntas que realicen los asistentes.

Sr. Ricardo Finger Camus.

—Muchas gracias, Miguel, por la invitación, y gracias a todos los participantes.

Como adelantaron en la introducción, esta charla trata esencialmente dos tópicos: el desarrollo de instrumentación astronómica en Chile, y el potencial de transferencia tecnológica de esta tecnología (Figura A1).



Figura A1

Como podemos ver parte de esta tecnología va desde la academia a la industria. En particular, me voy a concentrar en el trabajo realizado en el laboratorio que dirijo, el Laboratorio de Ondas Milimétricas de la Universidad de Chile. Este laboratorio se encuentra en Cerro Calán (Figura A2).

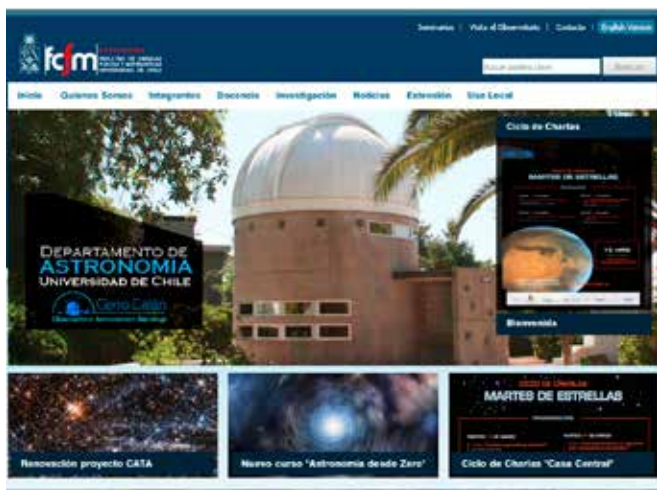


Figura A2

Cerro Calán es un cerro-isla que está en la comuna de las Condes, cerca del metro Los Domínicos y que les invito a visitar, ya que además la Municipalidad de las Condes está construyendo un parque alrededor del cerro, se llama Camino de Cintura, y desde ahí se pueden ver los cuatro puntos cardinales, la cordillera y la puesta de sol. Así que es muy recomendable hacerlo. Además, tenemos citas guiadas al observatorio, en el sitio web se pueden inscribir y el día del Patrimonio hay un gran evento que reúne muchos visitantes.

El Laboratorio de Ondas Milimétricas es un esfuerzo conjunto entre el Departamento de Astronomía y el Departamento de Ingeniería Eléctrica (Figura A3).

Desarrolla la llamada tecnología de *front-end* y *back-end*. No hay mejores palabras en español para nombrar eso, pero esencialmente va a quedar claro en el transcurso de la charla. Tiene que ver con *front-end*, lo que está más cerca del cielo, los primeros componentes, circuitos y dispositivos que detectan la señal, y *back-end* es la parte digital, es cuando esa señal ya fue procesada por los receptores, ya

fue reducida a una frecuencia intermedia que puede ser digitalizada. Después de la digitalización, se llama *back-end*, y ahí están, por supuesto, primero los digitalizadores y después el procesamiento digital de esta señal. Nosotros desarrollamos ambas tecnologías, tecnología analógica de front end, y tecnología digital de *back-end*. Entrenamos a estudiantes de pregrado y de posgrado, ofrecemos trabajos de tesis, de Magister, de doctorado, y hacemos transferencia tecnológica en colaboración con otras universidades y la industria.



Figura A3

Nuestro laboratorio consta de 20 personas (Figura A4).



Figura A4

La mitad aproximadamente está con contratos de largo plazo con la universidad, y la otra mitad está asociada a proyectos específicos, fondos concursables que tienen duración de dos o tres años, y que apuntan a resolver problemas específicos. Somos cuatro profesores, seis ingenieros eléctricos, dos ingenieros mecánicos y estudiantes de pregrado y posgrado que varían en el tiempo.

Quiero mencionar también en este momento que hay otros actores en Chile que desarrollan tecnologías similares en instrumentación astronómica y en transferencia tecnológica. Los dos principales actores, además de nosotros, son el Centro para la instrumentación Astronómica, CePIA, en la Universidad de Concepción, liderado por Rodrigo Reeves, y el Centro para Astroingeniería, en la Pontificia Universidad Católica AIUC, en Santiago, liderada por Roland Dünner. Estos son laboratorios similares, con menor cantidad de personas, pero con objetivos similares, que consisten esencialmente en desarrollar tecnologías para los observatorios y su transferencia a la industria.

El Laboratorio de Ondas Milimétricas tiene varias instalaciones, donde destacan principalmente el telescopio de 115 GigaHertz que tenemos en el cerro, que es un radiotelescopio que operó en Tololo durante muchos años y que fue donado a la universidad y ahora opera desde Cerro Calan (Figura A5).

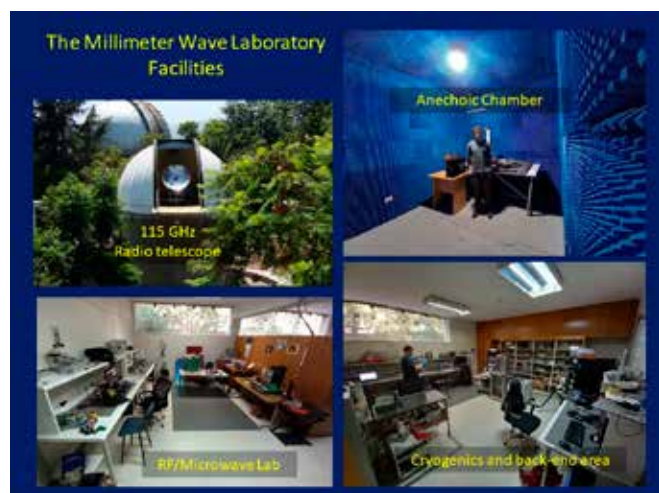


Figura A5

Ese telescopio se utiliza principalmente para docencia, para desarrollo tecnológico, para probar nuevas tecnologías sin tener que ir a los grandes observatorios en el norte, y también para hacer proyectos científicos menores. Naturalmente no es un telescopio competitivo con los grandes observatorios del norte, pero todavía permite hacer ciertos proyectos científicos. Es un telescopio que fue construido con un objetivo específico, detectar la molécula de monóxido carbono, CO, que en la Tierra la conocemos por la molécula de las combustiones incompletas, una molécula peligrosa.

Cuando el calefón está malo, además de CO₂, genera CO. El CO es mucho más peligroso que el CO₂, pero en el universo es una molécula muy útil porque es relativamente fácil de detectar, es brillante, tiene una línea de emisión en 115 gigahertz que es intensa y que, por lo tanto, nos permite detectarla en distintos lugares del universo. Tenemos además una cámara anecoica, que parece sala de grabación de audio, pero que en realidad es una sala de grabación de ondas electromagnéticas. Se utiliza para probar antenas, uno puede medir antenas adentro y medir los patrones de radiación. Tenemos un laboratorio de RF (Radio Frecuencia) y criogenia, porque estos receptores necesitan ser enfriados para bajar su ruido al mínimo nivel.

Tenemos también un taller mecánico bastante preciso, de hecho, me atrevería a decir, de lo más preciso en Chile (Figura A6).



Figura A6

Tenemos una fresadora CNC (Control Numérico Computarizado) y un torno CNC, ambos “top de línea”. La fresadora es una máquina alemana, Kern, y el torno una máquina suiza con precisión micrométrica. Y también un laboratorio de construcción de PCBs (Printed Circuit Board), esencialmente placas de circuitos. Esto es para que se hagan una idea del tamaño, del esfuerzo, tanto desde el punto de vista humano como desde el punto de vista de inversión en instalaciones.

Les cuento un poco de historia, cómo llegamos a hacer esto, por qué estamos haciendo instrumentación astronómica, a quién se le ocurrió y cuál fue el camino en esa dirección (Figura A7).



Figura A7

En el año 2006 comienza la construcción de este fabuloso radiotelescopio ALMA, que cuenta con 66 antenas parabólicas de 12 metros de diámetro cada una, con capacidad de observar hasta 950 gigahertz, que es altísima frecuencia, mucho más alto de cualquier frecuencia que se use comercialmente.

Este telescopio llega a Chile y tiene un receptor (Figura A8) que se instala bajo la antena, y que

está dividido en 10 bandas de recepción, de las cuales sólo cuatro estaban instaladas en un comienzo.

Aquí se pueden ver las 10 ventanas de observación, por donde estos receptores observan (Figura A9).



Figura A8



Figura A9

De estos, cuatro venían con el telescopio. La banda 3, banda 6, banda 7 y banda 9, que están a distintas frecuencias, desde 84 GHz en banda 3, hasta 720 GHz en banda 9. Estos cartuchos que se ven acá son los receptores. Estos cartuchos se insertan en el criostato por abajo y quedan observando a través de estas ventanas hacia el espejo secundario de la antena y finalmente hacia el cielo.

Entonces, surgió la idea. El telescopio llega con cuatro bandas, pero tiene potencial para 10 (Figura A10).

Hay seis bandas que todavía no están instaladas y algunas ni siquiera estaban asignadas para su construcción. Entonces, se planteó ¿por qué no intentamos hacer en Chile un prototipo?

Sólo uno de estos cartuchos, con el objetivo de demostrar a la comunidad astronómica y tecnológica internacional que es una tecnología que se podría realizar en Chile. Y ese fue el inicio de la idea de hacer instrumentación astronómica en nuestro laboratorio.



Figura A10

Ese primer prototipo fue un proceso que tomó del orden de seis años y fue principalmente realizado por estudiantes de magister y doctorado, que hicieron sus tesis en el desarrollo de los distintos componentes que un receptor astronómico necesita (Figura A11).



Figura A11

Este trabajo fue publicado en revistas científicas y nos valió la credibilidad de ser un laboratorio serio, que hizo un prototipo de un receptor con las especificaciones de ALMA. De esta forma, fue una apuesta para construir reputación, para demostrar las capacidades técnicas de Chile.

Este trabajo de los primeros cinco o seis años en el prototipo nos valió la invitación al consorcio que iba a construir la banda uno de ALMA (Figura A12).

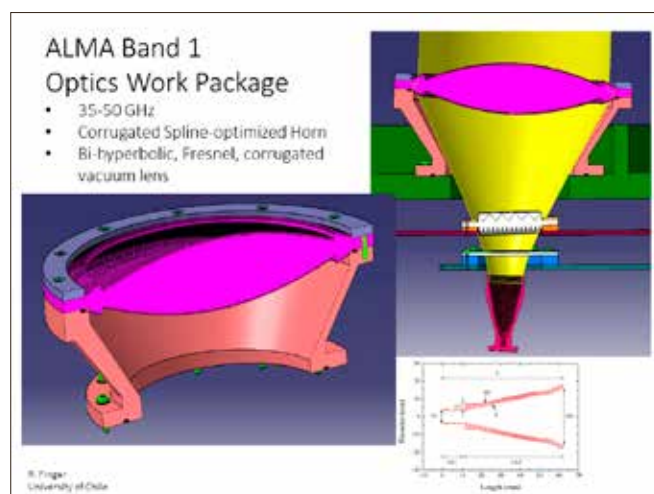


Figura A12

Este es un consorcio que se componía de institutos en distintos lugares, en particular Japón, Taiwán, Canadá, Estados Unidos y Chile. Y dentro del consorcio, se nos asignó el desarrollo de lo que se llama la óptica. En radioastronomía de altas frecuencias, sobre los 50 GHz se empiezan a mezclar un poco los conceptos de óptica y radio, porque las ondas de radio, a muy altas frecuencias se parecen a la luz. Al final la luz no es nada más que radiación electromagnética, simplemente a frecuencias muy altas. Entonces, en el caso de la banda 1, nosotros tenemos una antena que se llama “antena de bocina”, una especie de embudo para recibir la radiación que viene del cielo, pero antes de poder recibirla, tiene que ser colimada y filtrada y el proceso de colimación, se hace con un lente. Entonces, pueden ver una mezcla de antenas y lentes, que es como funciona en altas frecuencias. Nuestro trabajo era diseñar esta antena de bocina, los filtros infrarrojos que dejan el calor afuera para poder enfriar el receptor, que está a muy baja temperatura, cerca de 15 Kelvin y la lente, que permite colimar el haz que viene de la antena parabólica.

Estos dispositivos son muy precisos y complejos, dado que tienen muchas dimensiones distintas. En este perfil de la antena de bocina, pueden ver que la estructura tiene una serie de corrugaciones. Cada una de estas 44 corrugaciones tiene una dimensión distinta. Si uno la quiere optimizar, debe mover cada dimensión un poco y simular el desempeño óptico, digamos, necesita mover muchas dimensiones, y eso toma mucho tiempo. Tanto la antena de bocina como la lente requirieron mucha optimización para llegar a las formas finales.

Después de eso, había que construir esas formas finales, lo que tiene toda otra complicación, porque hay que construir las con errores menores a las 10 o 15 micrómetros (Figura A13).



Figura A13

Entonces, había que hacerlo con mucho cuidado, mirar al microscopio, corregir los procesos de manufactura, y después hacer metrología mecánica como radiométrica midiendo los patrones de radiación (Figura A14).

Esto, para obtener los productos finales que vemos en esta imagen, instalados en el telescopio (Figura A15).

Este es el primer caso de estudio que les quería mostrar. Es un caso de éxito en que un instituto en Chile desarrolla, diseña, prototipa y construye componentes de alta tecnología que en el pasado siempre habían sido provistos por institutos internacionales. Nunca un instituto chileno había

puesto en un telescopio un componente de alta tecnología. Habíamos participado en otras cosas, como en las obras civiles, habíamos hecho los caminos, habíamos provisto los generadores eléctricos, pero nunca habíamos hecho algo que fuera parte del instrumento astronómico mismo.



Figura A14

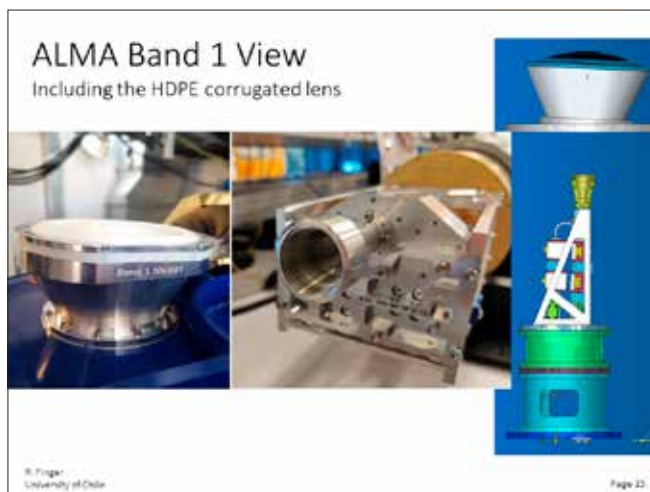


Figura A15

En el futuro seguimos trabajando en nuevos receptores (Figura A16).

Ahora estamos trabajando un receptor de la banda 2 que es esencialmente tres veces más alta la frecuencia y también tres veces más alto el ancho de banda.



Figura A16

No voy a entrar en demasiados detalles, pero estos cartuchos deben ser enfriados para reducir el ruido de la electrónica (Figura A17).

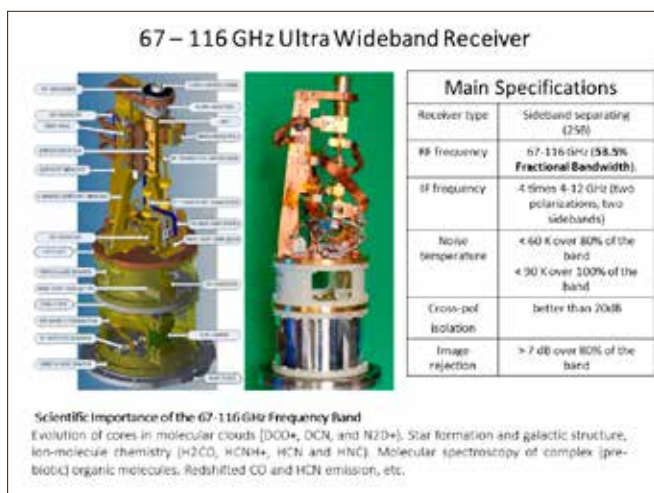


Figura A17

El disco superior se enfría a 15 grados Kelvin, es decir menos de 250 grados bajo cero, y eso requiere un diseño criogénico, mecánico, termal, muy preciso y cuidadoso. Entonces, se requiere no solo ingeniería eléctrica, sino también ingeniería mecánica, esencialmente interdisciplinaria.

Además, tenemos nuestros propios proyectos en bajas frecuencias (Figura A18).

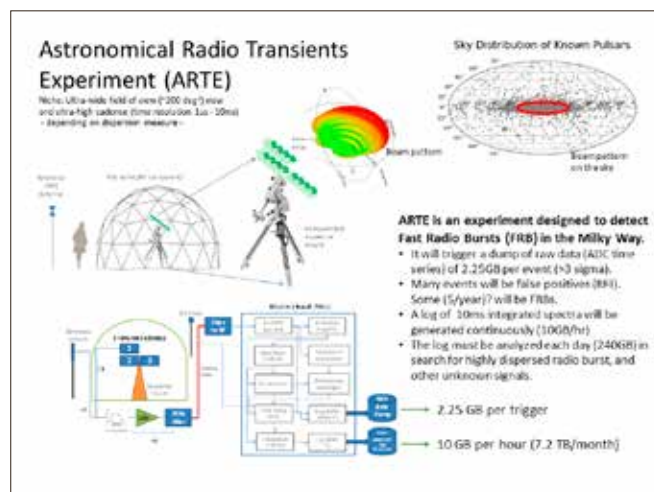


Figura A18

Este experimento opera en las frecuencias de radio, en frecuencias similares a las que operan los teléfonos celulares, y observa el cielo con un haz muy grande comparado con ALMA. Acá el haz que tenemos en el cielo es grande, porque el objetivo de este experimento es un nicho específico en astronomía, que es alto campo de visión para obtener más probabilidad de detección de señales muy cortas que se llaman *fast radio bursts (FRB)*, que son unas señales nuevas que fueron descubiertos hace una década, que son pulsos de radio extremadamente cortos, que duran algunos milisegundos, y que ocurren en distintos lugares del universo. No sabemos muy bien todavía cuál es la causa de estos pulsos de radio, pero este experimento tiene el propósito de detectar si es que ocurren en nuestra propia galaxia. Entonces la idea es mirar un alto porcentaje de la galaxia de manera simultánea, buscando estos pulsos. Los FRB son tan cortos que se debe tener un procesamiento digital muy rápido, de frontera, porque hay que digitalizar a tasas enormes. Aquí tenemos digitalizadores que están tomando datos a 64 gigabit por segundo, es decir esa es la cantidad de información que genera esta antena en todo momento, que no sólo tenemos que transmitir o almacenar, sino que tenemos que procesarla matemáticamente para detectar estas cortas señales.

La única forma de hacer esto es usando unos procesadores digitales paralelos, llamados FPGAs (Figura A19).

Son unos procesadores digitales que tienen altísimo paralelismo, son parecidas a las tarjetas gráficas o "GPUs" usadas en inteligencia artificial, pero más específicas para el procesamiento digital de señales.

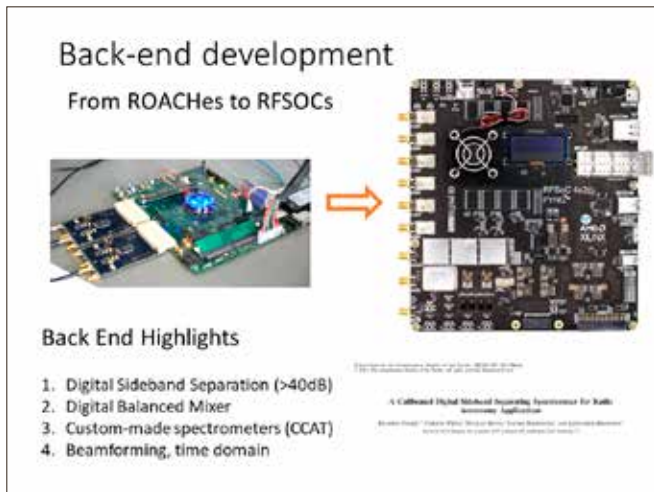


Figura A19

Esos son los casos que les quise mostrar desde el punto de vista de instrumentación astronómica, pero también les quiero hablar de transferencia tecnológica (Figura A20).



Figura A20

¿Cómo se puede conectar con la industria este trabajo que hemos hecho durante esta última década? Esta pregunta se nos ha formulado desde hace un tiempo, en parte porque nuestra agencia de financiamiento, ANID, está muy interesada en que la academia se conecte con la industria, y nosotros también estamos interesados en vincularnos. Mis primeros cuatro años de trabajo fueron en la industria de telecomunicaciones, arriba de las torres, instalando antenas.

Así que me interesa mucho, encuentro que hay problemas muy interesantes en la industria.

Les quiero dar dos ejemplos de desarrollos que estamos haciendo para la industria (Figura A21).

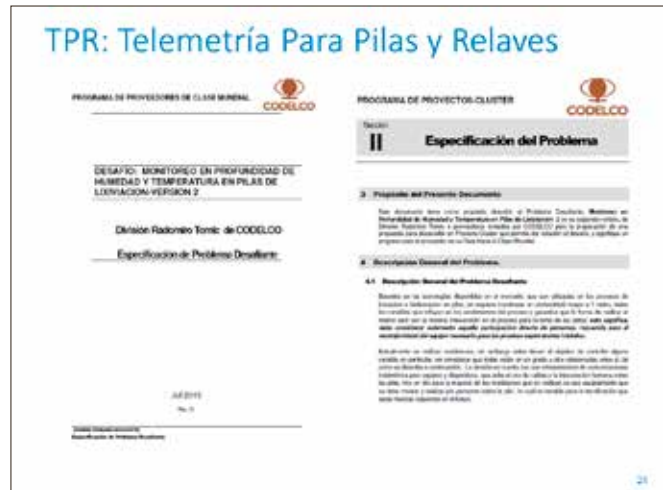


Figura A21

Estos desarrollos se basan en los conocimientos que hemos adquirido de alguna forma, desarrollando tecnología para la astronomía. El primero fue un proyecto que CODELCO publicó como un problema no resuelto e importante para ellos. Esta es la especificación de un problema relevante, relacionado con monitorear la humedad y la estabilidad de las pilas de lixiviación (Figura A22).



Figura A22

Las pilas de lixiviación son las tortas de mineral chancado que son parte de un proceso de la minería, que se riegan con una solución de agua y ácido sulfúrico. Esta solución se colecta y se lleva a piscinas, donde a través de electrólisis se obtiene el cobre. El proceso de lixiviación es todavía algo artesanal.

En esta imagen pueden ver estas mangueras que esparcen el líquido, pero hay lugares de la pila que están saturados de líquido (apados) y otros lugares de la pila que están secos. Esta situación reduce la eficiencia del proceso y, además, la parte que está aposada se puede desmoronar, generando un problema ambiental y operacional. Entonces, el problema es cómo podemos monitorear la humedad que hay en la pila a distintas profundidades en tiempo real, para poder controlar la cantidad de solución que estamos poniendo.

Un problema similar, es el de los relaves (Figura A23).



Figura A23

Los tranques de relaves tienen un muro, pero no es un muro como el de una represa hidroeléctrica, sino que el muro está hecho del mismo material del relave. Entonces, es muy importante mantener una distancia de seguridad entre el lago y el muro. Poder monitorear la humedad en distintos lugares del tranque es importante para saber si hay complicaciones.

Además, con el cambio climático y con las lluvias inesperadas, ha ocurrido en múltiples ocasiones que los tranques de relaves se desestabilizan y se desarman con resultados catastróficos (Figura A24).



Figura A24

Esto ha ocurrido en Perú y Canadá, entre otros. Uno de los casos más terribles ocurrió en Brasil, el año 2019, con 250 muertos por un tranque de relave roto.

Esto es un problema también muy presente.

Entonces, decidimos hacer unos monitores, que son parecidos a una estaca que tiene todo lo que se necesita para poder energizarse con energía solar y comunicarse a kilómetros de distancia. Son un sistema tipo IOT donde la parte más innovadora es el sensor de humedad que no necesita contacto con el terreno (Figura A25).

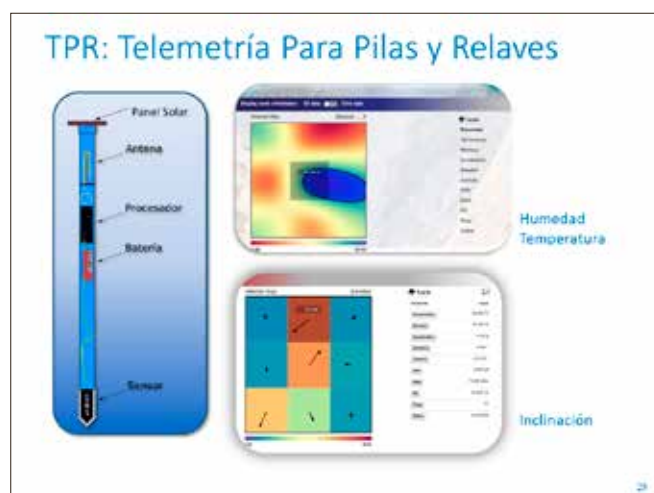


Figura A25

Puede estar sumergido en ácido ya que no tiene electrodos metálicos en contacto con el terreno. Poniendo varias de estas estacas podemos hacer un mapa de la humedad, pero también un mapa de la inclinación, porque las estacas tienen acelerómetros, entonces conocen su inclinación con respecto a la gravedad. Si las estacas empiezan a inclinarse en cualquier dirección, tenemos esa información en tiempo real. Esta es una solución que ha nacido de nuestro laboratorio para un problema específico de la industria.

Acá pueden ver los primeros prototipos, de baja resolución, en tubos de PVC (Figura A26).



Figura A26

El segundo ejemplo que voy a mostrar sobre transferencia tecnológica es la detección de marea roja (Figura A27).

Esto nace de una conferencia que escuché en el sur, donde la directora del centro COPAS contaba muy vívidamente que, al día de hoy, los sensores de marea roja son los consultorios, ya que es ahí donde se detecta la marea roja cuando la gente empieza a llegar intoxicada. Esto no constituye solo un problema de salud, sino también un problema económico, ya que la opción de la autoridad es cerrar las caletas de toda la comuna o región, con las consecuentes pérdidas económicas. Entonces, la pregunta es, ¿cómo podríamos tener un monitoreo en tiempo real y con buena resolución geográfica de la marea roja? De manera que, primero nos podamos adelantar a un posible evento de marea roja y, segundo, si es que necesitamos clausurar las caletas, clausurar exclusivamente las que están contaminadas y no la región completa.



Figura A27

Este problema lo resolvemos con una antigua técnica utilizada en astronomía, que es la espectroscopia (Figura A28).

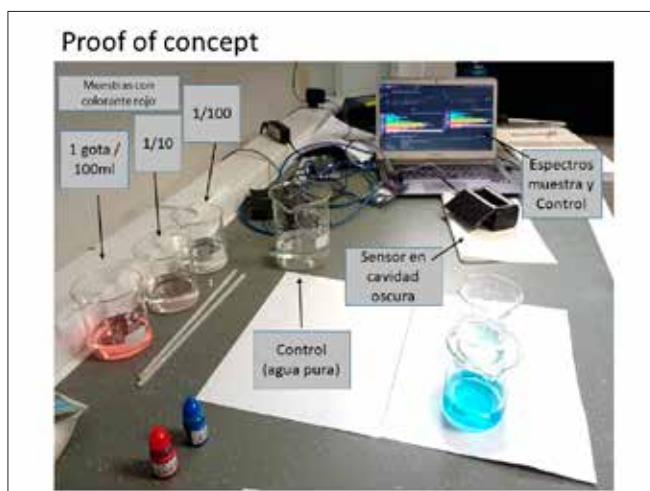


Figura A28

Esencialmente, lo que hicimos fue utilizar un sensor espectroscópico de baja resolución, nueve canales espectrales, desde el infrarrojo hasta el violeta, y determinar si, mirando a través de una columna de agua, éramos capaces de detectar cambios de coloración imperceptibles a los humanos. Entonces, preparamos muestras con una gota de colorante rojo después diluido en 10 y luego diluido en 100, a un nivel de dilución donde era imposible de percibir al ojo humano. Pusimos la muestra iluminada con luz blanca en un lado y recibíamos al otro lado la absorción producida

por la columna de agua. De esta forma, pudimos demostrar que somos capaces de distinguir claramente que muestras, incluso diluidas a un nivel imperceptible al ojo humano, tenían distintas coloraciones.

Esto nos llevó a hacer pruebas con algas (Figura A29).

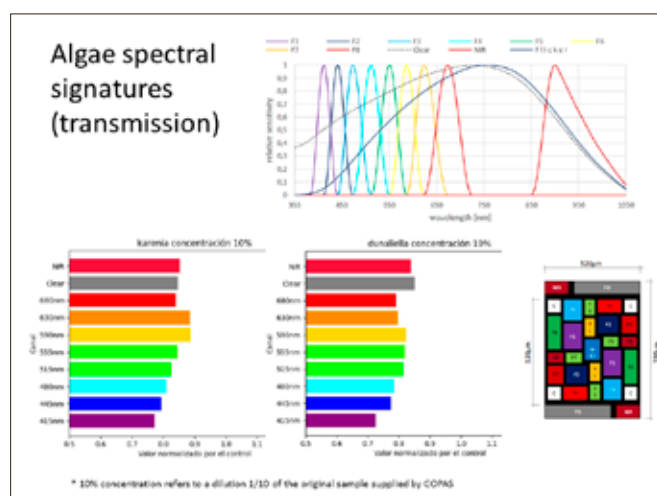


Figura A29

En colaboración con el oceanográfico COPAS pudimos encontrar firmas espectrales para distintas algas.

Este es otro proyecto que aborda un problema específico de la industria, de la comunidad, que puede ser resuelto con la tecnología desarrollada para la astronomía.



Figura A30

En resumen, somos un esfuerzo entre astronomía e ingeniería eléctrica y mecánica. Desarrollamos sistemas analógicos y tecnología digital de procesamiento rápido. Ofrecemos temas de memoria y tesis de grado. Tenemos a la fecha una experiencia probada en detectores astronómicos en alta y baja frecuencia y buscamos activamente transferencias tecnológicas y proyectos de innovación con la industria (Figura A30).

Muchas gracias.

Sr. Francisco Förster Burón.

—Muchas gracias, y feliz de estar después de la fantástica charla de Ricardo Finger con lo que han hecho, para contarles un poco de este proyecto que es ALeRCE (Figura B1).



Figura B1

ALeRCE, es un broker astronómico. Es un agente autónomo y es un proyecto que es bien interinstitucional e interdisciplinario, tenemos astrónomos, ingenieros, estadística, computación, una combinación que es la que le da la riqueza a este proyecto, y también está financiado por varias instituciones, el Centro de Modelamiento Matemático, el Instituto de Biología Metafísica, el Data Observatory y la Universidad de Concepción.

Voy a partir contándoles cómo es la infraestructura astronómica en Chile (Figura B2).

Esta es una imagen muy famosa que salió hace varios años atrás en el New York Times, discutiendo cómo es el futuro de la astronomía en Chile, y con un mapa de todos los telescopios importantes que están instalados y que se

están instalando. Acá tengo las imágenes de algunos que están contruidos, otros que se van a construir, otros que están en construcción. La idea central es que Chile es y va a seguir siendo la capital astronómica del mundo por mucho tiempo, y es una oportunidad enorme para Chile, para la astronomía, pero también para la ingeniería.



Figura B2

Una tendencia que se observa es que tenemos telescopios cada vez más grandes (Figura B3).

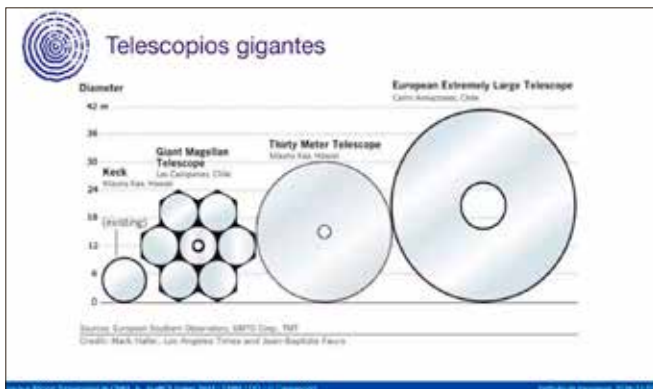


Figura B3

Pueden ver acá el diámetro de los espejos principales de los grandes telescopios que se están construyendo, comparado con el más grande del mundo actualmente, que es el Keck, en Hawaii, un poco más grande que los que están en Cerro Paranal, en Antofagasta. El Giant Magellan Telescope que se va a construir en Chile, el Thirty Meter Telescope, que se construiría en Hawaii, y el European Extremely Large Telescope, que tiene 40 metros de diámetro.

Acá está una imagen de cómo se vería el Giant Magellan Telescope, el Thirty Meter Telescope, o TMT, y el Keck (Figura B4).



Figura B4

Acá les muestro una foto de lo que se está construyendo, es una foto, ya no es una impresión artística, y es realmente una obra de ingeniería increíble. Estamos hablando de un edificio cercano a los 80 metros.

Eso es lo que va moviendo la astronomía, los espejos cada vez más grandes, cada vez más lejos, cada vez más profundos, pero, por otro lado, están pasando otras cosas (Figura B5).



Figura B5

Todos conocen la Ley de Moore, que básicamente es la miniaturización de los transistores, en que cada vez podemos poner más transistores en un chip. Probablemente es lo más importante que ha ocurrido en la segunda mitad del siglo XX, y que sigue ocurriendo. Esto también tiene

consecuencias para la astronomía y lo voy a mostrar en este gráfico; la primera vez que lo vi, me impresionó mucho (Figura B6).



Figura B6

En este gráfico se muestra en escala logarítmica, en función del tiempo, distintas cantidades. Primero, el número de transistores por CPU, son los puntos amarillos. Luego, el crecimiento del área colectora de los telescopios, que es la línea celeste, que crece exponencialmente, pero no tan exponencialmente como los transistores. Lo interesante son los puntos rojos, el número de galaxias que se observa cada vez. Esto está desactualizado, pero lo primero que nos damos cuenta es que la Ley de Moore y el área colectora de los espejos son diferentes, y el número de galaxias observadas en realidad está siguiendo a la Ley de Moore, no al área colectora de los telescopios. Este es otro fenómeno que está ocurriendo, que es en paralelo al crecimiento del área colectora de los telescopios.

Esto ha significado que hay una nueva generación de telescopios de levantamiento, o Survey Telescopes, que se muestran en este gráfico (Figura B7).

Acá se muestra el campo de visión en grados cuadrados. Esto indica cuán profundo puedo ir, y cuánta área cubre del cielo. El producto de los dos es el tamaño de estos círculos, que se llama "étendue" que da una idea de cuánto volumen eres capaz de levantar en una sola observación. Acá hay un telescopio que domina claramente, que es Vera Rubin Observatory, con su Legacy Survey of Space and Time, LST, que va a comenzar a operar a fines de 2025. Este telescopio va a revolucionar la astronomía, y nos va a permitir extender el dominio temporal, de una forma que

nunca habíamos podido hacer. Vamos a tener una película del cielo, básicamente durante 10 años.

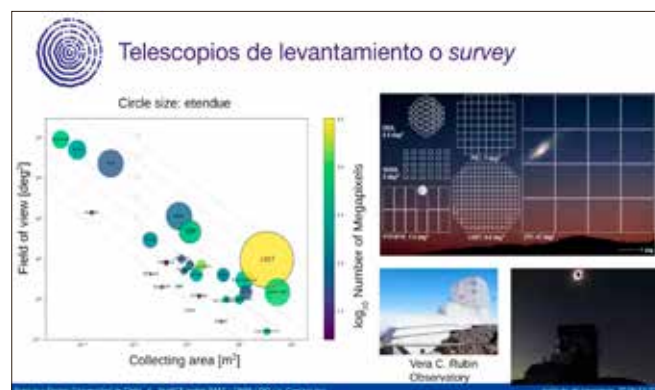


Figura B7

¿Qué pasa entonces con el estudio del dominio temporal en astronomía? (Figura B8).

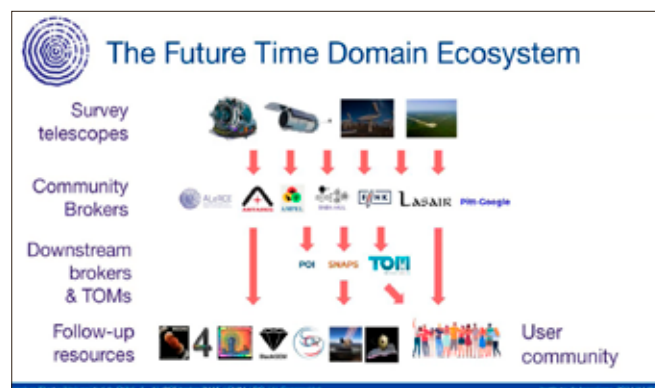


Figura B8

Básicamente lo que tenemos es una capa de telescopios de levantamiento, como Vera Rubin, pero también telescopios en el espacio, que van a estar monitoreando cambios, buscando cosas que estén cambiando. También en radio, el Square Kilometer Array en Sudáfrica o también en otras formas de obtener información, como ondas gravitacionales.

Estos telescopios van a estar reportando cambios, que están ocurriendo en el cielo a una tasa que una persona no es capaz de procesar. Entonces se necesita una nueva capa, que se llaman los Brokers comunitarios. Acá están los 7 Brokers de Rubin, donde está ALeRCE. Son los intermediarios con

otros Brokers, especialistas en casos científicos diferentes, y sobre todo con los telescopios de seguimiento. Si tengo un telescopio que tiene un instrumento de muy alta tecnología que es capaz de caracterizar un objeto, y realmente decir cuál es la naturaleza de ese objeto, yo tengo que decidir entre este mar de datos, cuáles observar por la noche.

Esta es una foto de hace un par de semanas, de Vera Rubin (Figura B9).



Figura B9

Ya está el domo construido, se instaló el telescopio principal, y de hecho la semana pasada se tomaron las primeras imágenes, se abrió la cámara por primera vez, y se está haciendo los últimos ajustes para tener la primera foto que va a salir en la prensa de todo el Mundo y va a iniciar este proyecto.

Les voy a mostrar un video del proyecto (video y audio).

“Cielo nocturno. Nuestra ventana al universo más allá. Inmenso. Misterioso. Poderoso. Silenciosamente hermoso. Eventos cósmicos al borde de nuestra imaginación se desenvuelven en la oscuridad, listos para ser descubiertos. Cuando miramos al cielo nocturno, vemos hacia el pasado. Historias sin contar, llevadas a través del espacio por la luz. La gran historiadora del cosmos. La tecnología ha evolucionado a lo largo de los siglos, permitiéndonos llegar más lejos, al borde de nuestro horizonte. Inventamos telescopios para explorar y cámaras para capturar estos mensajes indiferentes. Sin embargo, el cosmos cambiante permanece oculto. Un nuevo telescopio abre su ojo y lo captura todo. Los objetos que se mueven y aquellos que destellan. Incluso aquellos que no podemos ver con nuestros ojos. Cubre el cielo cada poca noche, encontrando todo lo que ha cambiado.

Y dentro de minutos, cada pieza de información es llevada alrededor de la Tierra, a cualquiera que esté esperando para explorarla. ¿Qué descubrirás tú que nadie ha visto antes? Es hora de averiguarlo”.

Bueno, ahí mostraron un poquito la motivación (Figura B10).

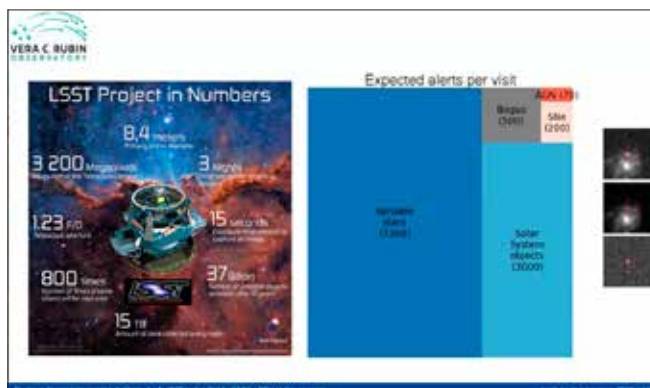


Figura B10

Esto es muy bueno porque explica un poco el problema. Se están estudiando eventos que varían en el tiempo. Todas las cosas que vieron ahí son basadas en astrofísica real, como eventos conocidos. Y es un problema también de datos, de procesamiento masivo de datos, donde la inteligencia artificial va a jugar un rol super importante.

Acá hay algunos números relevantes de este proyecto. El telescopio no es especialmente grande. Tiene 8,4 metros de diámetro. Lo que tiene especial es la cámara, que tiene 3.200 millones de píxeles. Cada 40 segundos aproximadamente, va a estar tomando una imagen de 3.200 millones de píxeles. Va a generar una cantidad enorme de datos que se van a almacenar. Estamos hablando de cerca de 15 terabytes de datos todas las noches. Y esto va a armar un catálogo del orden de 37 mil millones de objetos en el cielo. Aparte de ese catálogo, que es el catálogo estático de objetos, cada vez que el telescopio visite un área en el cielo, va a detectar cambios. Cerca de 7 mil estrellas que están variando su brillo, del orden de 3 mil objetos del sistema solar se están moviendo, del orden de 3.200 supernovas están activas, agujeros negros supermasivos, 70, y no más de 500 cosas que son falsas. Acá tengo un ejemplo de cómo se vieron estas apariciones. Hay una galaxia, de repente aparece un punto, se lo resta, se da dos imágenes, detecta que hay algo al lado. Eso sería una supernova.

El año 2019, se hizo un llamado a todos los interesados para construir estos brokers, que van a contribuir al stream de datos en tiempo real, que se va generando en cada visita (Figura B11).



Figura B11

Son del orden de 10 millones todas las noches. Se hizo una llamada a la carta de intervención en 2019, la propuesta en 2020, y se seleccionaron 7 brokers en 2021. Son 3 brokers en Estados Unidos, 3 brokers en Europa, y uno en Chile y en todo el hemisferio sur, que es ALerCE.

Acá pueden ver los proyectos que se están desarrollando.

¿Qué es un broker? (Figura B12).

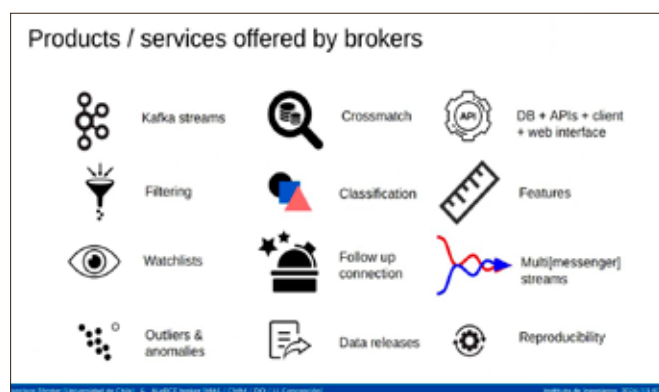


Figura B12

Lo estamos definiendo a medida que lo estamos construyendo. Lo básico que debería ser un broker es poder ingerir este stream de datos, anotarlo, clasificarlo, y aportar la información a los usuarios que no son capaces, que no tienen la capacidad para recibir este stream de datos. También cruzar bases de datos en tiempo real, proveer acceso a los datos, filtrar clasificar, caracterizar distintas funciones que estamos definiendo a medida que vamos construyendo estos sistemas

Entonces, ¿qué tipo de datos tenemos? Acá voy a hablar de datos que recibimos del telescopio ZTF que está en Estados Unidos. En este momento estamos trabajando con datos del telescopio que está en Estados Unidos (Figura B13).

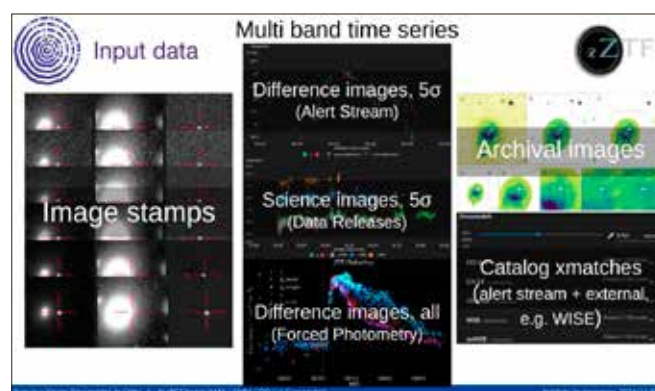


Figura B13

Recibimos imágenes, secuencias de imágenes, básicamente centradas en los objetos que se van detectando. En este caso es una supernova. Pero también tenemos series de tiempo en multi-bandas, En el caso de este telescopio son dos bandas, pero en el caso de Rubin van a ser seis bandas. Tenemos imágenes que son basadas en diferencia, imágenes basadas en catálogos donde más se han captado, imágenes basadas en las diferencias, volviendo a los puntos donde se detectaron cambios. Tenemos también imágenes de contexto, de archivo. En este caso, imágenes de galaxias con distintos campos de visión, distintas resoluciones, y también básicamente todo lo que está en los catálogos que se conocen, que uno tiene que ir cruzando en tiempo real. Esto se llama los *crossmatches*.

Entonces, ¿qué es ALerCE? (Figura B14).



Figura B14

Es un árbol en el sur de Chile. Le dimos este nombre para tener la identidad y también porque suena como “alert”.

¿Cuáles son las preguntas que tenemos? Queremos entender la naturaleza de los fenómenos, por ejemplo, ¿cómo y por qué se expande el universo? ¿cómo se forman los elementos de la tabla periódica? (Figura B15).



Figura B15

También está la naturaleza de los agujeros negros supermasivos, que se han puesto muy de moda con la imagen del agujero negro que se tomó hace un par de años, así como la naturaleza de estrellas variables, lo que más vamos a ver en Rubin. Y también la naturaleza de los objetos del sistema solar. De hecho, una de las razones por las que se construye este telescopio es para hacer el inventario más completo de todo lo que está en el sistema solar, y explicar aquellos objetos que podrían presentar algún riesgo para el planeta y poder reaccionar con tiempo.

En el equipo, somos muchos investigadores (Figura B16).

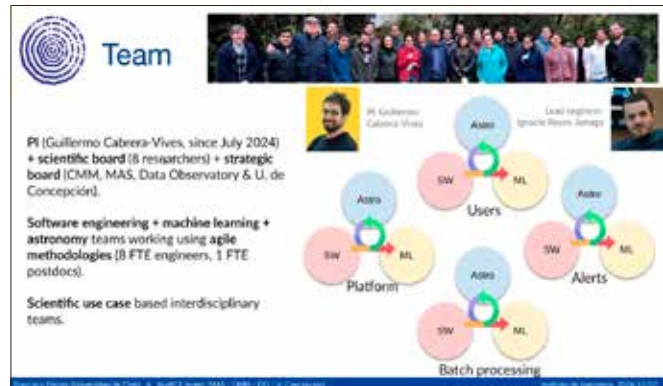


Figura B16

Hasta julio de este año yo fui el investigador principal, pero rotamos dentro del proyecto, y el nuevo investigador principal es Guillermo Cabrera, de la Universidad de Concepción. El ingeniero jefe es Ignacio Reyes y básicamente tenemos un equipo de ocho ingenieros de computación e ingenieros eléctricos. Están divididos en distintos grupos, equipos, que se dedican a resolver distintos problemas. Hay un equipo de ingeniería detrás, para mantener un broker funcionando todos los días del año, 24 horas. Entonces tenemos el equipo de ingeniería de software, de machine learning y de astronomía, usando metodologías ágiles. Esas son cosas que hemos aprendido de la industria. Siempre con los objetivos científicos, definiendo para dónde vamos.

Hemos publicado muchos papers (Figura B17).



Figura B17

Lo más interesante es que hay muchas publicaciones buenas fuera de Chile que están haciendo uso de ALeRCE. Hace poco hice una estadística y conté 200 artículos, 144 de ellos que pasaron por referato, que mencionan ALeRCE, y tenemos un ejemplo de un paper de un grupo en China que dice que experimentaron con varios brokers y escogieron ALeRCE. Entonces estamos entre los brokers más usados en el mundo.

Esta es la comunidad de usuarios de más de 130 países, que teníamos hace dos años (Figura B18).

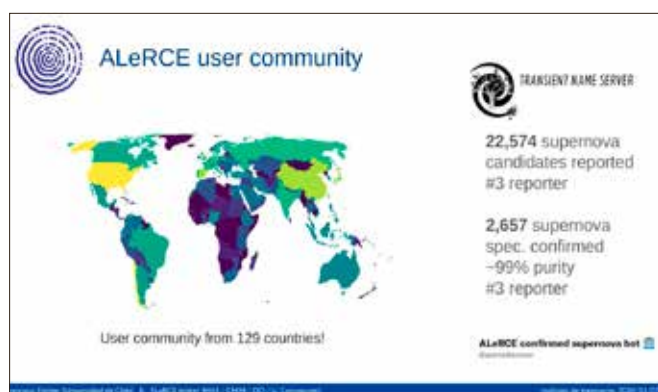


Figura B18

Este año hice una estadística y, como pueden ver, el usuario principal está en China, y varias veces más que el segundo. Eso es muy diferente a lo que pasaba hace dos años atrás (Figura B19).

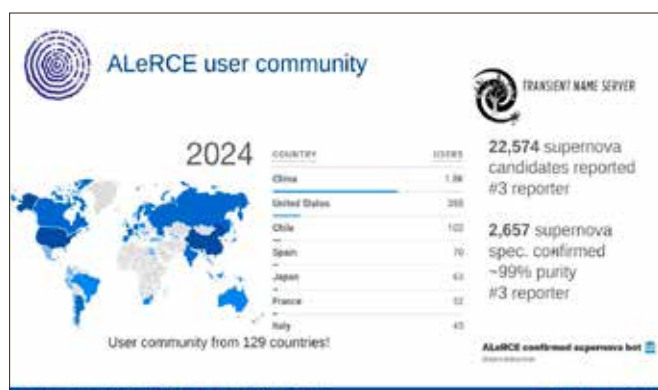


Figura B19

Ahora bien, estamos viendo lo que está pasando en el mundo. China está tomando un papel cada vez más importante. También en este tiempo reportamos más de 22.000 supernovas a la comunidad internacional. Más de 2.600 supernovas han sido espectroscópicamente confirmadas, es decir, nosotros reportamos un candidato y un telescopio en algún lugar del mundo toma un espectro. Lo que nos preocupa es tener una pureza muy alta para que efectivamente la gente crea en el trabajo que realizamos en Chile. Tenemos que lograr esta credibilidad, haciendo algo desde Chile.

Voy a mostrar algunas cosas que hemos desarrollado (Figura B20).



Figura B20

Esto se llama el ALeRCE Supernova (SN) Hunter. Permite revisar, todos los días, las últimas supernovas, los mejores candidatos de supernovas. Hace, en este caso, de 100 a 200.000 eventos a una lista que puedo revisar y dar feedback al sistema para mejorar los clasificadores.

También tenemos ALeRCE Explorer, la herramienta que usamos para mirar los objetos (Figura B21).

Todos los objetos son clasificados como supernovas de un tipo particular. Se muestran su serie de tiempos, metadatos, imágenes, imágenes de contextos, en qué catalogo se conoce este objeto. Y se ha convertido en una herramienta estándar que se usa en todo el mundo.

Ahora voy a hablar de la parte de Image Learning (Figura B22).



Figura B21

En 2019 dijimos ¿qué es lo más rápido que podemos hacer para clasificar los objetos? Lo más rápido es usar la primera imagen de la detección. Sería como esta tripleta que vemos en la imagen a la izquierda. Usamos la red convolucional y algunos trucos como varianzas rotacionales y fuimos capaces de clasificar rápidamente en una taxonomía sencilla las clases más importantes. Eso nos dio como el clasificador más rápido que podíamos lograr en tiempo real y nos permitió reportar más de 22.000 supernovas a la comunidad.

También tenemos otros métodos basados en imágenes (Figura B24).



Figura B22

¿Dónde va todo esto? Voy a hablar de los modelos que están basados en imágenes (Figura B23).

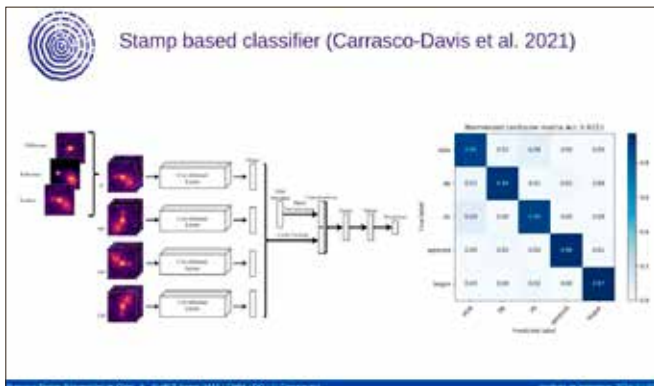


Figura B23

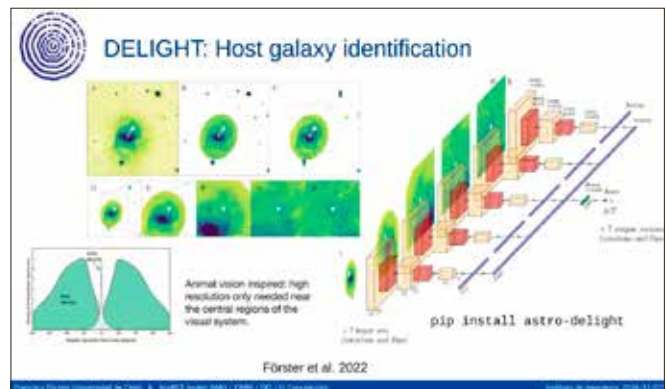


Figura B24

Por ejemplo, si tengo una supernova, me gustaría saber a qué galaxia pertenece. Para eso también podemos usar redes convolucionales y acá usamos un truco que es tratar de imitar lo que hace el ojo humano, que tiene más resolución en el centro de la imagen y menos resolución en la periferia. Esta es una forma más eficiente de tratar con los datos. Nosotros replicamos eso con imágenes multi resolución y funcionó mejor que los modelos que eran mucho más lentos. Entonces esto lo podemos aplicar en tiempo real.

También tenemos clasificadores que son basados en la serie de tiempos (Figura B25).

Acá tenemos una taxonomía más compleja. Ya tenemos información del tiempo a partir de la primera imagen. Ahora tenemos una secuencia temporal y podemos clasificar en una taxonomía más fina (Figura B26).



Figura B25

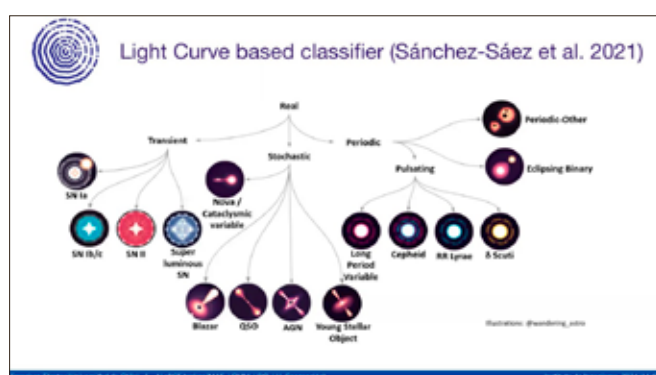


Figura B26

Tenemos objetos que son explosivos, transientes, objetos que varían de forma estocástica, generalmente son objetos que tienen un disco de acreción que está variando. Y objetos que son periódicos, que están pulsando, que están eclipsando, otro tipo de periodicidades.

En 2019 armamos un clasificador (Figura B27).

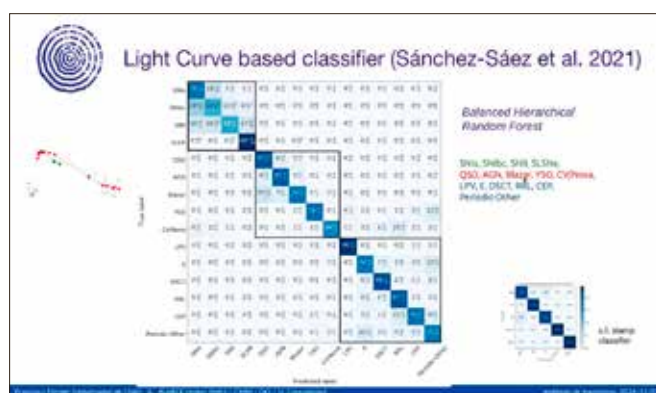


Figura B27

Estos papers se publicaron en 2021 pero el sistema partió funcionando en 2019. Usamos una técnica que se llama el *random forest*. Usamos una técnica que se llama el “Random Forest” que permite clasificar una taxonomía, de modo que, si la matriz resultante es muy cercana a la matriz identidad, se asume que las clases identificadas están correctamente separadas (a esto se le llama “matriz de confusión”). Funciona bastante bien y hasta el día de hoy se sigue usando este clasificador.

Después lo modificamos (Figura B28).

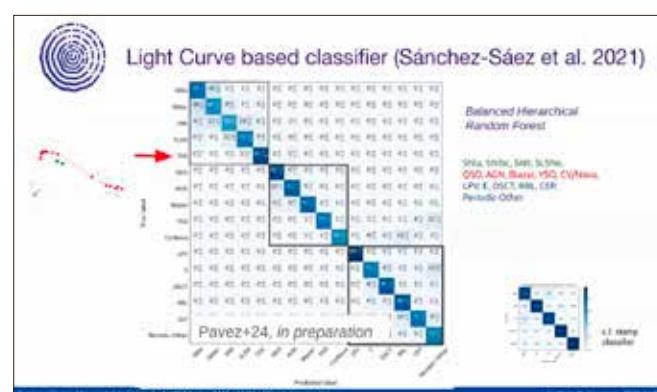


Figura B28

Agregamos clasificadores basados en redes neuronales y este *random forest* que es como el *machine learning* más tradicional les ganaba a los métodos más nuevos, hasta que aparecieron los modelos de atención, básicamente la tecnología que está detrás de los modelos de lenguaje como chatGPT. Entonces, en 2023 en paralelo en Santiago y Concepción fuimos los primeros grupos en el mundo que aplicamos estos modelos de atención para la clasificación de serie de tiempos en astronomía. Fue la primera vez dentro de la colaboración que logramos ganar al *random forest*. Por fin estaba por arriba del Random Forest que era el material clásico. Lo mismo ocurrió en Concepción, pero dentro de la misma colaboración de ALerCE.

Desarrollamos modelos cada vez más complejos (Figura B29).

Usa tanto las series temporales como las características que se calculan de esas series como entrada, para construir este tipo de clasificadores.

Ahora le agregamos muchas más clases (Figura B30).

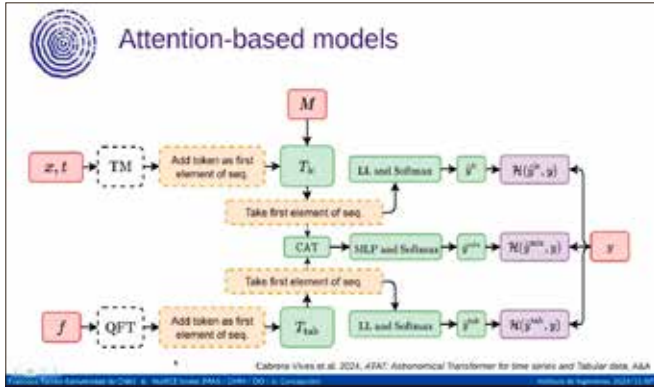


Figura B29

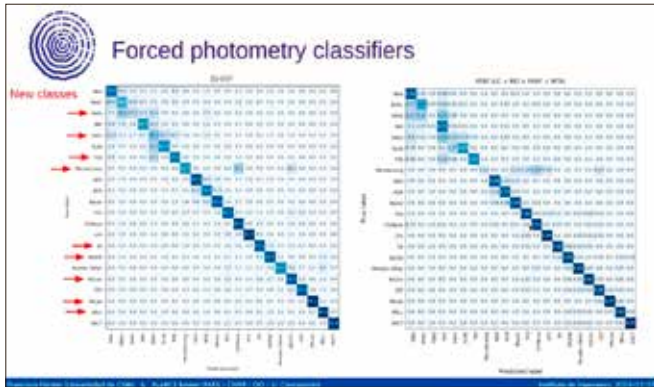


Figura B30

Increíblemente, el modelo es capaz de clasificarlas bastante bien. Estamos tratando de clasificar rápido, con poca información y en una taxonomía muy fina cuando se tiene más información.

Este es como el paso cero. Lo que es más interesante para Rubin y para los telescopios que vienen, es la detección de las anomalías. De las cosas que no se conocen. Si hay un premio Nobel que venga de este telescopio, probablemente va a ser acá (Figura B31).

Sobre la detección de cosas que no esperábamos, hay muchas técnicas diferentes para hacer esto (Figura B32).

Algunas están basadas, por ejemplo, en estudiar la distribución de probabilidades de todos los objetos, y en buscar zonas de baja densidad de probabilidad y ahí hay candidatos a ser objetos nuevos. Si encuentro un objeto nuevo, voy a buscar un objeto que esté cerca y empiezo a poblar una población nueva. También hay métodos que

se basan en tratar de reconstruir los datos. Por ejemplo, si a un modelo que se entrenó con muchos gatos y perros, le muestro el lince; me va a reconstruir un gato y no sabe cómo reconstruir un lince. Y hay una gran diferencia entre las dos imágenes. ¡Entonces eso me dice, ah!!, esto es un dato que no se ha visto. Un candidato *outlier*. O también puedo tratar de predecir lo que va a pasar.



Figura B31

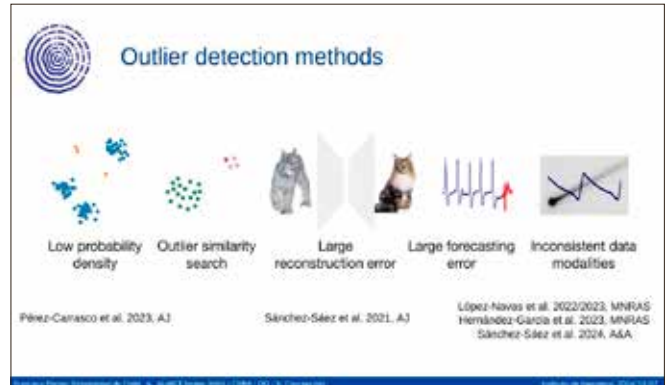


Figura B32

Y si mi predicción es mala, eso también puede ser un *outlier*. Puede ser un *outlier* en el sentido de que está viviendo una fase anómala de su evolución. Otro método puede ser comparar modalidades diferentes de datos. Por ejemplo, la serie de tiempo. Uno esperaría, dado lo que ve la serie de tiempo, que este objeto se vea en la imagen como un punto, una galaxia, o como un cometa en este caso. Si hay inconsistencias entre estas modalidades de datos, eso también es un candidato a *outlier*. Sorprendentemente, los mejores resultados han sido con este último método; comparar modalidades de datos diferentes. Es decir, *machine learning*

multimodal, que combina distintos tipos de datos, textos, imágenes, audio, entre otros.

De hecho, uno de estos resultados fue una colaboración, Paula Sánchez, que actualmente está en ESO, en Alemania, descubrió un agujero negro supermasivo prendiéndose en tiempo real (Figura B33).



Figura B33

Hay una galaxia que no hacía nada especial y de repente, el centro de la galaxia empezó a brillar de una forma anómala, el agujero negro se prendió porque empezaron a caer estrellas y formaron un disco de acción. Estamos pasando a ver esa actividad, así que tenemos acceso a cómo se prende el disco de acción de un agujero negro supermasivo.

Otra cosa que estamos implementando son modelos de lenguaje exploratorios (Figura B34).



Figura B34

La gran dificultad que tenemos nosotros para llegar a los usuarios astronómicos es permitirles explorar la base de datos que estamos armando de una forma intuitiva más fácil. Por eso hemos desarrollado interfaces web. Lo que yo quisiera hacer es poder preguntarle a la base de datos en un lenguaje natural y que me dé una respuesta que podría ser como la pregunta o la consulta en el lenguaje de la base de datos. Entonces estamos jugando con eso.

Como ejemplo: “dame distintas propiedades de series de tiempo que son clasificados como supernovas. De un tipo 1a, según su curva de luz, y una probabilidad mayor que 0,6.” En este caso, me da esta pregunta que es correcto (Figura B35).

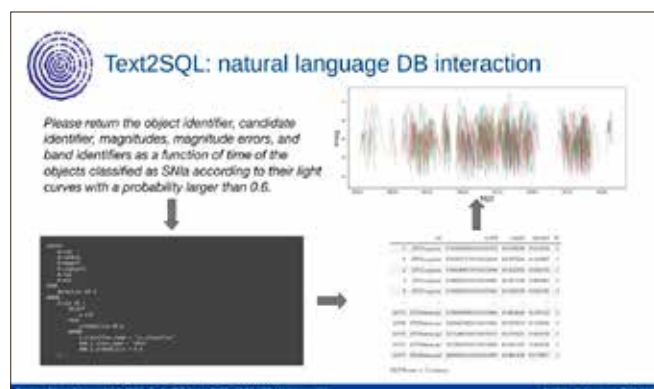


Figura B35

Este es el resultado y acá están todas las supernovas (Figura B36).

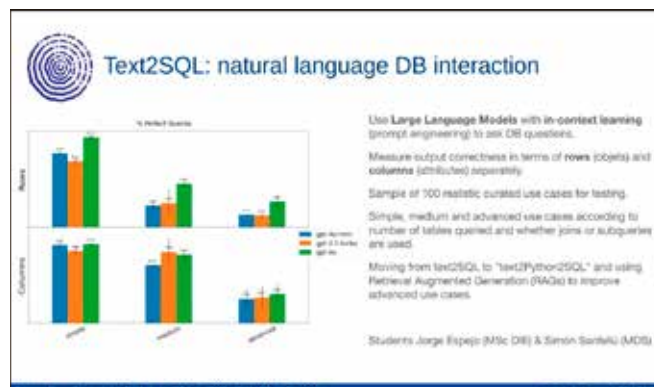


Figura B36

Junto con el profesor Pablo Estévez, los estudiantes Jorge Espejo y Simón Sanfeliú, hemos estado ya más de un año probando esto y hemos visto que si uno clasifica las consultas en distintos niveles de dificultad, encuentra básicamente que, en las consultas simples, los últimos modelos, el GPT4, por ejemplo, el 93% de ellas obtiene correctamente los objetos.

Entonces, acá lo que hicimos fue dividir entre los objetos que se entregan en la consulta, pero además las columnas que yo le pedí se entreguen correctamente. Pero cuando tenemos consultas avanzadas, que requieren cruzar 3 tablas de distintas propiedades, en realidad están muy en pañales y todavía no lo están haciendo bien.

Entonces una cosa que estamos haciendo es pasarnos de consulta de texto a SQL a Python ¿Por qué? (Figura B37).

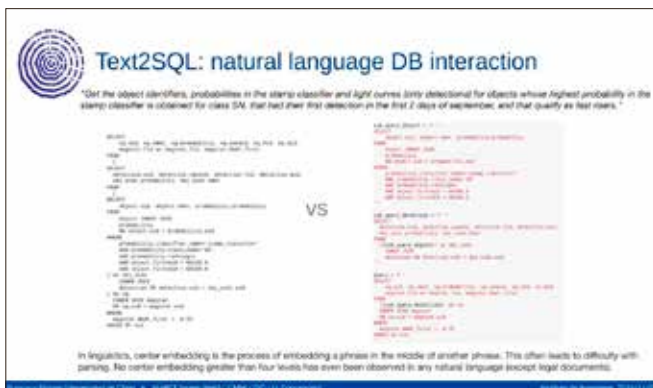


Figura B37

Esto es algo reciente. Si uno trata de hacer una consulta que tiene varias tablas, básicamente esta consulta está un poco anidada. Y esto en lingüística se llama *Center Embedding*.

Cuando uno tiene una oración, anida varias otras oraciones o varias ideas. Esto, en general, para nuestro cerebro, es muy difícil de entender. Y en lenguaje natural observado no se ha visto nunca un ejemplo con más de 4 anidaciones. La única excepción es el lenguaje legal, donde es costumbre anidar ideas. Para el cerebro es difícil entenderlo y también es difícil para los modelos de lenguaje. Entonces lo que estamos haciendo es tratar de sacar estas anidaciones usando Python.

Los siguientes pasos y desafíos van a ser (Figura B38):



Figura B38

Mejorar la infraestructura, escalar a Rubin, moverse hacia la detección de *outliers*, moverse a modelos multimodales, incorporar toda la información que un astrónomo o astrónoma tiene que mirar para tomar la decisión. Si uno solamente tiene un aspecto, la curva de luz, de los datos, puede tener información muy parcial. Realmente necesitas mirar todo lo que hay disponible para poder tomar una decisión más informada. Y desde el punto de vista de astronomía, siempre estar al día, investigando nuevos casos de uso, nuevas clases que son interesantes, curación de datos, tener buenos datos de entrenamiento.

Más hacia el futuro y voy a mostrar este paper de 2020, donde el gráfico muestra el error de los modelos (Figura B39).

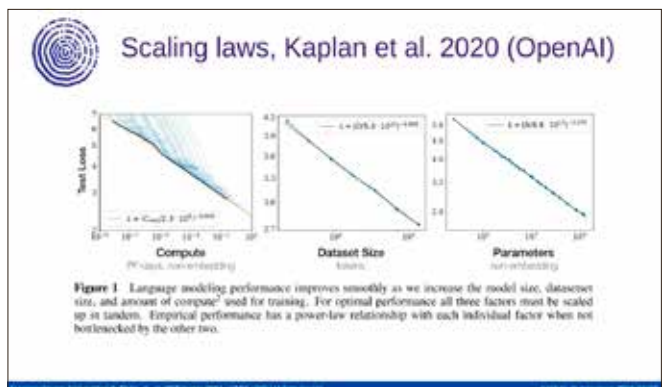


Figura B39

En escala logarítmica en el eje Y, y en escala logarítmica en el eje X, ¿cuánto poder de cómputo se necesita? ¿Cuál es el conjunto de datos de entrenamiento? ¿Cuál es el número de parámetros del modelo? Y en todos los casos, esto decrece

como una ley de potencia. Entonces, mientras más poder de cómputo, mientras más grandes los datos, mientras más grande mi modelo, mejor lo voy a hacer.

¿Hacia dónde vamos? (Figura B40).

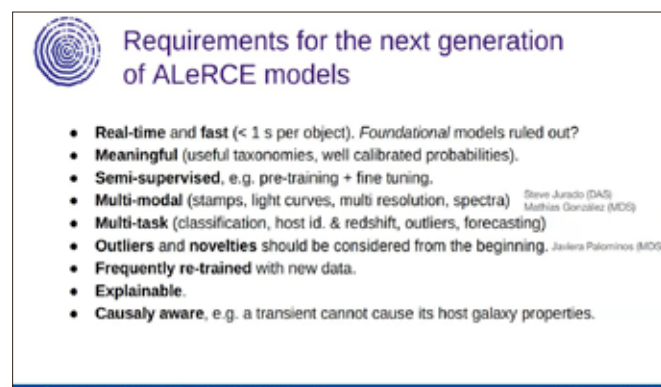


Figura B40

Vamos a unos modelos que van a ser en tiempo real, van a ser muy rápidos, van a funcionar en menos de un segundo por objeto, tienen que significar algo para los usuarios, tienen que ser útiles. Tenemos que usar todas las etiquetas que se conocen, eso se llama entrenamiento semi-supervisado, pero también los datos que no están etiquetados tienen que ser multimodal. Incorporar todas las modalidades, tienen que ser multitarea, queremos resolver varios problemas, distintos problemas pueden aprender uno del otro. Los *outliers* y las novedades son fundamentales. Tenemos que ser capaces de re-entrenar, hacer esto explicable, y ojalá en algún tema emergente en *Machine Learning*, que el modelo entienda las causalidades. Hay variables que no pueden causar otra variable. Por ejemplo, la predicción de cuando una persona se va a salir de la suscripción de una empresa. Una de las variables que tenía el sistema era cuántos descuentos le ofrezco a la persona. Lo que pasaba es que las personas de alguna forma veían que iban a salirse de la empresa y le empezaron a ofrecer más descuentos. Entonces ¿qué aprende el modelo? que mientras más descuentos, más probable que se salgan. Eso va en contra de la intuición. Si uno hace eso con un modelo causal, la relación se recupera como debería ser, esa es la frontera en el modelo de *Machine Learning*, y el futuro.

Vamos a tener modelos que van a hacer muchas tareas (Figura B41).

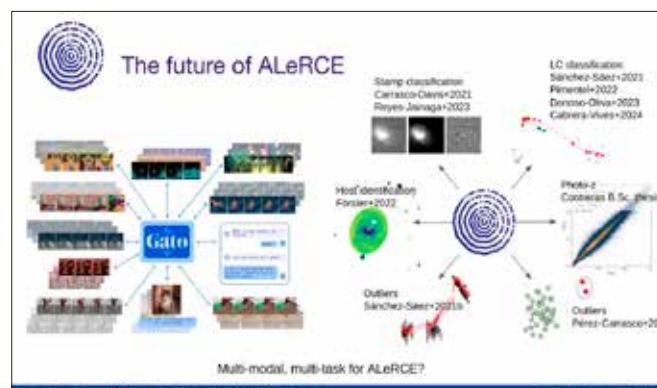


Figura B41

Pero esto va a requerir mucho poder de cómputo también, ese es el gran desafío en el área (Figura B42).



Figura B42

Muchas gracias.

A continuación de las exposiciones, los Sres. Finger y Förster responden a los asistentes consultas y comentarios. Hace de moderador don Miguel Ropert.

Sr. Diego Tapia.

—Es interesante la información entregada, a dar solución a la inestabilidad de taludes en la minería de acopio de relaves, la pregunta es si es viable monitorear esto en los asentamientos urbanos, sobre las dunas, un problema social que fue noticia en la quinta región. Quiero agregar a la pregunta, ¿Esta tecnología que están desarrollando, ustedes la pueden ofrecer a otros países que tengan este mismo tema?

Para el monitoreo de las pilas de lixiviación y la estabilidad de taludes de material de rechazo en la minería ¿cuál es el costo de suministro, fabricación y montaje de esta instrumentación en un área minera?

Sr. Ricardo Finger C.

—Efectivamente, cuando ocurrió este problema en la quinta región, inmediatamente se pensó que es un problema similar. Más aun, la inestabilidad de terrenos ocurre tanto en terrenos intervenidos, como en terrenos naturales. Por ejemplo, en San José de Maipo hay riesgo de aluviones por remoción en masa. Efectivamente, este sistema puede beneficiar todos los casos en que la saturación del suelo con agua signifique un riesgo para la estabilidad del terreno.

Respecto al estado de *readiness* de la tecnología, todavía no ha salido del laboratorio, entonces me cuesta estimar, por ejemplo, el valor del despliegue comercial. Esto normalmente ocurre a través de un proceso de licencia y después una empresa ve cuál es su estructura de costos, y cómo finalmente vende esto a la industria. Entonces, probablemente nosotros no vamos a ser los comercializadores directamente, porque no está en el rol de la universidad la comercialización de la tecnología, pero sí el desarrollo y el licenciamiento. Esperamos poder sacarlo del laboratorio en aproximadamente seis meses.

Sr. Miguel Ropert D.

En lo que mencionabas con ARTE, ¿qué esperan de eso? o ¿qué es lo que han recibido ya?

Sr. Ricardo Finger C.

—ARTE es un experimento específico. Aborda un nicho especial, un tipo de observación exótica, por decirlo de alguna manera. Este es un caso muy particular de señales de radio que duran unos pocos milisegundos y por su corta duración, otros telescopios no detectan. Estamos mirando un trozo grande de la galaxia, pero nuestra sensibilidad no es muy buena. Entonces, solo somos sensibles a eventos extremadamente brillantes, que ocurran cercanos, en nuestra galaxia. La tasa de esos eventos es desconocida, porque todavía no hay suficiente estadística para saber cuántos de esos eventos ocurren en una galaxia como la Vía Láctea en un año. Puede ser cualquier cosa desde 10^{-6} o tres o cuatro al año, ese sería el mejor de los mundos. Sin embargo, todavía no tenemos la respuesta, no tenemos ningún evento claro, identificado como un *Fast Radio Burst* en nuestra galaxia. Lo que sí tenemos son montones de eventos de interferencia electromagnética. Desafortunadamente, este es un telescopio que funciona justo en la banda de celulares, en la banda de radar, es decir, tenemos un tsunami de falsos positivos, por decirlo de alguna manera, que nos tiene muy atareados. Entonces, después de limpiar eso, esperamos tener algunas detecciones al año.

Respecto a cuál es el origen de las señales, el consenso va en la dirección de que está relacionado a un tipo particular de estrellas de neutrones que se llama “magnetares”. Estas son estrellas que tienen un campo magnético muy intenso y ese campo magnético se podría reconfigurar en eventos cortos y en ese proceso se emite esta radiación muy intensa. Eso es lo que se cree, pero nosotros solo vemos el fenómeno. Podría haber distintas fuentes, distintos progenitores astrofísicos que podrían generar señales de similares características. Es todavía una conversación abierta.

Sr. Miguel Ropert D.

—En el caso del observatorio Vega Rubin, no me quedó claro ¿ustedes están directamente o también compiten en ese mismo observatorio con los otros bloques?

Sr. Francisco Förster B.

—La razón por la que hay números infinitos de brokers es por un tema técnico, porque el ancho de banda es enorme y no es posible distribuirlo a toda la comunidad. Entonces, los brokers son los responsables de hacer la redistribución. Estamos compitiendo de alguna forma y colaborando también. Acá no hay un tema científico, pero sí, efectivamente, lo que está pasando es que estamos encontrando distintos nichos. Nos estamos especializando en distintas cosas. Lo que a nosotros nos ha parecido más interesante es el aspecto de inteligencia artificial y la detección de *outliers*. Para allá nos vamos a mover. Pero hay otros brokers que han enfrentado el problema de una forma diferente, se han enfocado más en tener un filtro que sea definido por el usuario. Los usuarios definen lo que quieren. A nosotros, en cambio, nos interesa tratar de clasificar de la mejor forma, basado en el conocimiento astronómico.

Sr. Miguel Ropert D.

—*En el tema de la transmisión de datos, es impresionante el volumen que están recibiendo, que se transmite. ¿Cómo está el país preparado para eso? ¿Estamos dando el ancho como país? ¿Cómo se han puesto estos grandes observatorios?*

Sr. Francisco Förster B.

—Estamos bien gracias a REUNA que ha creado la carretera de datos y ha sido también apoyada por los observatorios. REUNA colabora con los observatorios.

Hemos hecho pruebas de conexión y llegamos en segundos con Estados Unidos sin problemas. De hecho, nuestro servidor principal donde se va a correr el pipeline de procesamiento la pusimos en REUNA. Para estar seguros.

Porque hay un problema que se llama el problema de la última milla. Y cuando tú pones tu máquina en alguna universidad puede que haya algún camino que estén tomando los datos que hace que, en realidad, en vez de 10 GB por segundo, tenga 100 veces menos. Entonces, para ahorrar estos problemas y gracias a la colaboración con REUNA, tenemos muy buena conectividad.

Sr. Miguel Ropert D.

—*Por último, quisiera preguntarles un tema que está bien vigente y que nos tiene un poquito preocupados. El tema de la contaminación lumínica. Se está hablando bastante de este país que está recibiendo grandes inversiones. Como decía el presidente Sr. Barros, estamos siendo la capital de la astronomía ¿Cómo está ese tema?*

Sr. Ricardo Finger C.

—Es un tremendo tema, en el que necesitamos crear conciencia. Afortunadamente estamos avanzando en regulación. Hace 20 años esto no estaba ni siquiera en la mente de nadie y hoy en día existe regulación escrita de cuáles son las características de las luminarias públicas y privadas, los espectros. Hay colores que son particularmente malos para la astronomía como los azules y otros que la astronomía puede tolerar un poco mejor. Esa ley también especifica los ángulos en los que deben iluminar las luminarias, que es algo muy obvio, pero que no se estaba haciendo en el pasado. En el pasado, uno tenía faroles esféricos como los del parque forestal, que es exactamente lo contrario a lo que uno necesita. Eso es perder energía hacia el cielo en vez de iluminar la tierra, las calles, las veredas. Afortunadamente, esa nueva ley es un comienzo, pero falta mucho de cultura, porque la ley no genera un comportamiento en la población inmediatamente. Esa ley la conocemos los que estamos en este mundo y no la conoce nadie más, entonces yo creo que un paso importante sería mover este conocimiento a los arquitectos, mover esto a los constructores. Hay cosas simples que podemos hacer todos como, por ejemplo, la iluminación ornamental. Mucha gente quiere tener sus casas iluminadas en el exterior. Uno puede seguir teniendo iluminación ornamental, pero en vez de ponerlo en el suelo iluminando hacia arriba al muro, uno la debe poner en la parte alta del muro iluminando hacia abajo. Son cosas menores, pero que necesitamos poner en la cabeza de la gente que está construyendo las nuevas casas, diseñando los nuevos edificios. Entonces, al final yo creo que tiene que haber una cultura para entender que la luz es contaminación y tenemos que hacer los máximos esfuerzos por contenerla.

Sr. Francisco Förster B.

—Ricardo Finger dijo lo más importante. Sólo quiero complementar que, si bien tenemos leyes, creo que el problema es la fiscalización. Es muy difícil fiscalizar una ley donde tienes a una persona del Ministerio encargada de todos los chilenos. La página que compartí es una forma de ayudar como fiscalización ciudadana, por ejemplo, para ver que las luminarias estén correctamente instaladas. Básicamente hay que educar, que muchas veces es un *win-win*, digamos, porque si tú estás iluminando el cielo, estás perdiendo dinero. Otro problema importante es el de los satélites. Por ejemplo, Starlink nos permite tener internet de alta velocidad en lugares que antes no se podía. En el futuro vamos a mirar el cielo y vamos a ver sobre todo satélites, más que estrellas. No sé cómo se va a resolver. Parece que es como una marea roja imparables.

Sr. Ricardo Finger C.

—El caso de Starlink es particularmente decididor porque pudo haber sido minimizado si hubiese habido una coordinación previa. Pero se levantaron los satélites sin preguntarle a nadie. Como todas las contaminaciones, uno no puede abogar por eliminarla absolutamente. Es muy difícil, necesitamos poner satélites, es parte del desarrollo de la comunidad, de la comunicación. Pero hubiese sido mucho más fácil mitigar la contaminación en las primeras etapas de diseño de esos satélites. Haberlos diseñado para que tuvieran un bajo brillo. Ahora que ya no se puede corregir, hay que esperar que esos satélites se bajen de órbita para poner satélites nuevos que sean menos brillantes. Hay que hacerlo de una forma inteligente. Tratemos de encontrar un punto de minimizar la contaminación, pero que el desarrollo tecnológico pueda seguir su curso.

Sr. Francisco Förster B.

—De hecho, Starlink, ha trabajado para minimizar ese impacto. Los pintan negros, son superficies lisas, como estos aviones espía. Para que tengan una idea, la estrella Magnitud 7, que es muy brillante, equivale al brillo de una

caja de zapatos blanca. Eso es más o menos el impacto que debería tener para que tenga Magnitud 7. Y hay compañías que están lanzando satélites del tamaño de una cancha de tenis. Y más brillantes que Venus.

Sr. Miguel Ropert D.

—*Gran tema. Gracias por la opinión de ambos, Francisco, Ricardo, y muchas gracias por las dos conferencias. Por mi parte, termino y le doy la palabra a nuestro presidente Juan Carlos Barros.*

Sr. Juan Carlos Barros M.

—*Muchas gracias. Miguel, gracias, Ricardo y Francisco, por las presentaciones.*

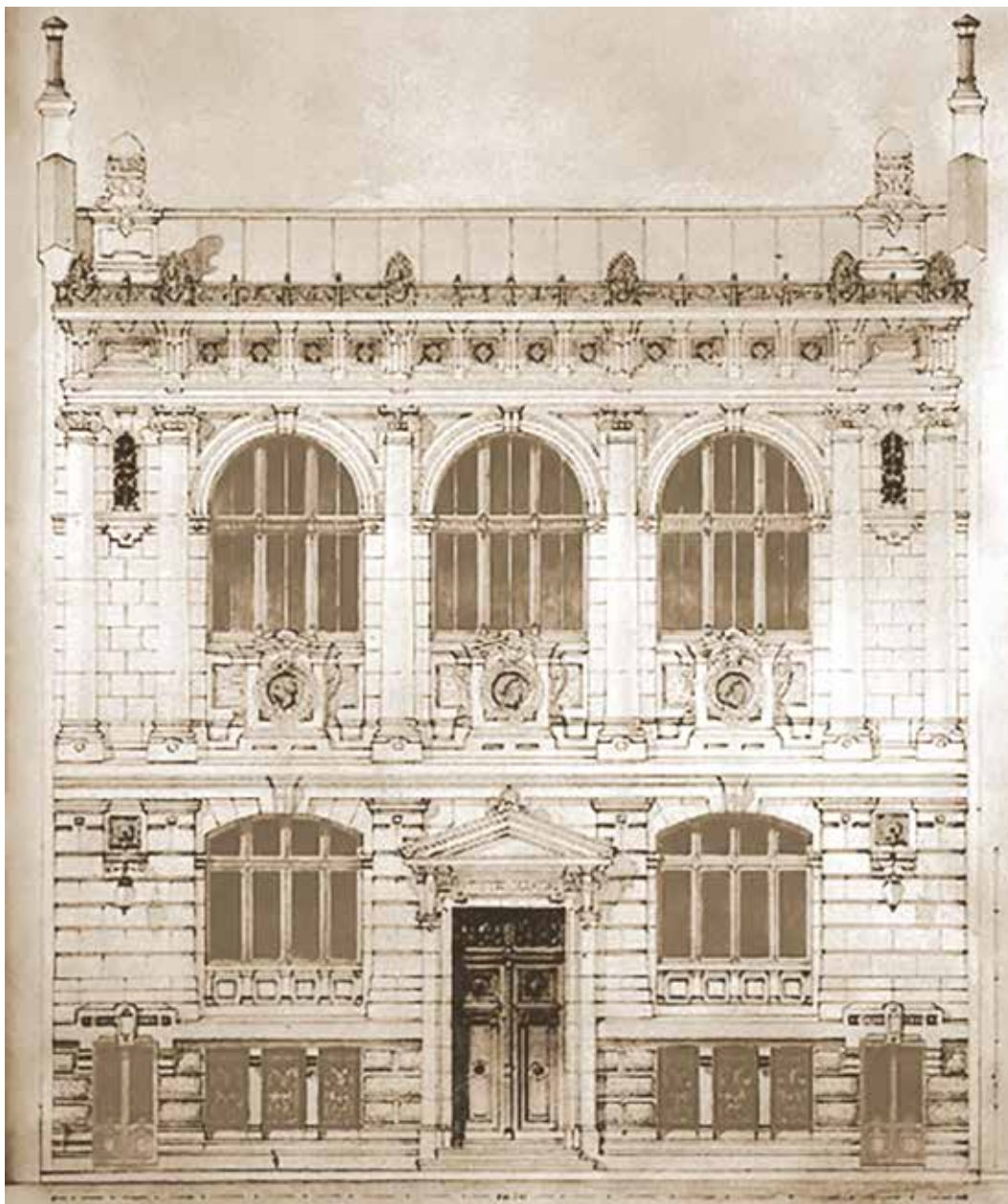
Acá, lo que hemos visto, es un gran potencial que hay para el desarrollo de nuevas tecnologías en base a la investigación científica y tecnológica. Esto es algo que hace tiempo se está tratando de armar: las empresas de base científica y tecnológica. La universidad tiene una visión de licenciar las tecnologías. Y no veo, por lo menos en la Universidad de Chile, una iniciativa de formar empresas de base científica y tecnológica, como una suerte de start-up que salgan de ahí mismo. Quizás eso no está dentro de las visiones, pero creo que es algo interesante de explorar, porque las aplicaciones que dio Ricardo son importantes. Hay temas relevantes, como los relaves mineros, como lo que hemos visto en la conferencia anterior sobre el tema de las dunas. Francisco, el desarrollo que estás haciendo tú puede tener muchas aplicaciones en la industria y creo que puede ser diferente si de la misma universidad salen empresas como una start-up de base científica y tecnológica a licenciar la tecnología. Yo creo que es un camino que podemos seguir explorando.

Finalmente, les quiero dar las gracias a todos los asistentes por la participación. Ha sido muy interesante.

Muchas gracias.

Fin de la conferencia.

ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS



Como una necesidad de preservar la historia de ingenieros o ingenieras destacados de la Ingeniería, la Comisión de Ingenieros en la Historia Presente sigue en una serie de entrevistas, con el objeto señalado.

En esta ocasión, se presenta un extracto de las entrevistas realizadas a la Ingeniera Sra. Salomé Martínez Salazar y al Ingeniero Sr. Andrés Navarro Haeussler.

Estas entrevistas, como las que se hagan en el futuro, serán objeto de una publicación especial.

SALOMÉ MARTÍNEZ SALAZAR.

Inmenso aporte a la educación de matemáticas en nuestro país.

Salomé nos cuenta que en sus últimos años de Educación Media le comenzó a gustar mucho la matemática y la física, por lo que entró a ingeniería en la Universidad de Chile. Decidió estudiar Ingeniería Civil Matemática en primer año, cuando se dio cuenta de que en matemáticas las cosas se demuestran. Fue en el curso de Cálculo 1 con Rafael Correa, que era un muy buen profesor, nos dice, donde confirmó que lo que le gustaba era la matemática. Nunca se planteó estudiar en otro lugar que no fuera la Universidad de Chile. Comenta que, además del gran prestigio de la FCFM, estaba el hecho de estudiar en lugar con gran libertad académica, una universidad pública que ha sido fundamental para la construcción de Chile.

Como influencia en su trayectoria académica y profesional recuerda a su profesor guía y futuro colega Patricio Felmer, con quien trabajó muchos años y quien la entusiasmó a trabajar en temas de educación. También a Pablo Dartnell y María Leonor Varas, de quienes reconoce haber aprendido mucho. Y nos recalca que, por supuesto, su padre Servet Martínez ha sido muy importante, como inspiración y por su visión muy amplia de la matemática y sus aplicaciones, y una ética de trabajo inigualable. Cree que en su vida profesional toda su formación ha sido útil. Si tuviera que elegir, dice que los cursos de Análisis fueron los más importantes para su formación.

Sus primeros pasos en la ingeniería fueron cuando tuvo que gestionar proyectos propios y pensar en el diseño de recursos para la formación docente. Destaca su investigación en matemática, relacionada con ecuaciones en derivadas parciales y el estudio de modelos matemáticos de ecología matemática y todo su trabajo en educación. Ha tenido el privilegio de colaborar extensamente con el Ministerio de Educación, y de generar nuevas iniciativas a partir de proyectos con el apoyo de FONDEF. A través de ello, ha buscado mejorar los aprendizajes desarrollando programas y recursos elaborados en base a evidencia, con procesos rigurosos, testeos, y mejora. Nos comenta que todo esto está en el corazón de cualquier proyecto de ingeniería.

Por ejemplo, ha contribuido en la creación y posterior participación por casi 10 años, del programa de formación docente “Suma y Sigue”, que genera un modelo instruccional



con sustento tecnológico, formando un gran equipo, y formulando un modelo de implementación a nivel nacional con perspectiva territorial. Por otra parte, ha apoyado al Ministerio de Educación en la instalación en todo el país de los textos escolares “Sumo Primero”, generando una gran red de colaboración con universidades y sostenedores, así como en la elaboración de herramientas basadas en IA y en el despliegue de instancias de formación docente. Salomé nos señala que estos proyectos, de interés nacional, requieren una visión desde la ingeniería, y han sido una línea de trabajo muy relevante para el Centro de Modelamiento Matemático (CMM).

Como un aporte a la ingeniería, sostiene que ha aportado una manera de hacer las cosas en educación matemática. Esto ha requerido reflexión y aprendizaje profundo de la matemática escolar, generar equipos permanentes diversos, redes de trabajo extensas, y trabajar con una perspectiva nacional. Por otra parte, fue parte de un grupo de académicas que trabajaron en pos de la equidad de género en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y la creación de la Dirección de Diversidad y Género, siendo su primera directora. Cree que también ha aportado

a la ingeniería desde ese lugar, trabajando por que haya más mujeres ingenieras y por generar conciencia respecto de las brechas que enfrentan las mujeres en la ingeniería y la academia.

Sostiene que ha tenido muchas anécdotas, en que gran parte se las reserva para contarlas cuando se jubile. La mayoría tiene que ver con el machismo que muchas mujeres tienen que aguantar durante su vida profesional, que mínimamente son el “mijiteo” en contextos profesionales. Por ejemplo, cuando estaba en la Comisión de Igualdad de Género y Desarrollo Académico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (2013-2015), quien la dirigía les dijo: “esta comisión no es para hacer caridad y no es para pedir sala cuna”. Orgullosa nos cuenta que ese fue precisamente uno de los logros de esa comisión, lograr la instalación de una sala cuna para estudiantes en el marco de un programa JUNJI.

Ha tenido vínculos con muchos ingenieros e ingenieras destacadísimas dentro de la Facultad. Además, dentro de su equipo trabajan muchos ingenieros e ingenieras, particularmente en la gestión de proyectos y en la elaboración de recursos, por ejemplo: ingenieros matemáticos, en computación, mecánicos e industriales.

Nos comenta que siempre ha decidido participar en temas donde piensa que será un aporte, que sean desafiantes, y que contribuyan al bien común. Cree que se valora en general muy poco a quien trabaja para apoyar el desarrollo de un proyecto colectivo, y está muy presente en la academia un espíritu de que quien asume un rol de responsabilidad, lo asume solo. También nos comenta sobre la falta de recursos permanentes para su Laboratorio de Educación Matemática, lo que atenta contra el tiempo que se requiere para formar personas y mantener el trabajo a largo plazo.

Le preguntamos qué otra disciplina ha influido en su trayectoria profesional, y no duda en decirnos que es la educación.

Como aporte a la enseñanza de la ingeniería, cree que ha aportado en la equidad de género en la FCFM, en visibilizar brechas, sesgos e injusticias que enfrentan las mujeres.

Como aportes a otras organizaciones en la que ha estado, destaca lo que han hecho con Sofía Bustos en la Dirección de Transferencia e Innovación del CMM. Sofía, nos dice, es una psicóloga muy brillante y han trabajado hace muchos años en CMM, particularmente creando e instalando el Laboratorio de EM. Con ella, han empujado por instalar trabajo colaborativo entre las distintas áreas del CMM, valorizar el trabajo que hacen los ingenieros e ingenieras, y mejorar la gestión de proyectos.

Cree que con su trabajo en educación descubrió que es muy sociable y amistosa, y que le gusta trabajar con personas distintas. Mantiene una filosofía en su desarrollo profesional, y que nos comparte: “atreverse a aportar”.

Para Salomé los valores que considera importantes y que trata de mantener son la rigurosidad y la perseverancia, y el compromiso con la verdad en lo que uno hace. Le preguntamos cómo se definiría, en una palabra, y nos dice “entusiasta”. Salomé recibió el año 2024 el premio “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas” que otorga el Instituto de Ingenieros de Chile.

Le consultamos cómo ha visto el desarrollo de la ingeniería en el tiempo, y sostiene que hay una visión mucho más amplia hoy de lo que es hacer ingeniería y también en las personas que hacen ingeniería. Señala que hoy en día, hay muchas más mujeres ingenieras en todas partes, con programas de equidad en muchas carreras, y que esto va a producir un cambio muy grande a futuro.

No está segura si les daría un consejo a las nuevas generaciones. Si les podría contar que ha podido trabajar desde la matemática y la ingeniería en ámbitos muy diversos, lo que no se imaginaba cuando entró a la facultad. Que piensen que nada está escrito respecto de lo que harán en el futuro, que hay un mundo de posibilidades.



ANDRÉS NAVARRO HAEUSSLER.

Un notable ingeniero emprendedor que deja su huella en Chile y la región.

Desde niño, la ingeniería estuvo presente en su vida, pues su padre era ingeniero civil y le contaba entretenidas historias relativas a su profesión. Por otro lado, tuvo la oportunidad de cursar su último año de colegio en los Estados Unidos. Lo que más le sorprendió de ese país fue comprobar como el uso de la tecnología en los más diversos ámbitos impactaba en la calidad de vida de sus habitantes y explicaba en gran medida su nivel de desarrollo. Por lo anterior, estudiar ingeniería le resultaría muy natural y también desafiante para lo que podría ser su vida profesional.

Entró a la Universidad Católica de Chile y desde los primeros años sintió una especial atracción por los ramos más duros de la carrera como matemáticas, física o mecánica, que le daban una sólida base conceptual para entender y resolver problemas. Una parte fundamental de su formación la obtuvo al participar de instancias dentro de la universidad donde compartió con estudiantes de facultades tan diversas como medicina, economía, historia, leyes o artes, por citar algunas, de quienes aprendió que el conocimiento y las formas de aproximarse a él son infinitas. En los últimos años de la carrera trabajó en la Casa Central de la universidad haciendo programas computacionales para el uso en las áreas de contabilidad y administración, lo que provocó una cercanía con el entonces emergente mundo del llamado procesamiento de datos.

Una vez egresado y trabajando en su memoria de título tuvo la idea de generar una empresa dedicada a la computación e informática. Pensó que el campo de acción que se abriría en este tema era enorme, las empresas y el quehacer del Estado requerirían cada vez más del concurso de estas herramientas para desarrollarse y ser competitivas. Por ello y dado que en su familia tenían una cierta disponibilidad de fondos producto de una herencia, le planteó esta aspiración a su padre, quien desde el primer momento le dio todo su apoyo.

Así nació SONDA, emprendimiento en el cual su familia aportó el 45% del capital inicial y Copec el 55%. A partir de ese 1° de octubre de 1974, su carrera profesional ha estado íntimamente ligada al quehacer de SONDA. Con el correr de los años, la Compañía se fue desarrollando y creciendo, y pasó por diferentes etapas de consolidación



de su estructura, negocios y presencia geográfica. En 2024 SONDA tuvo ingresos por US\$1.500 millones con una dotación de 15.000 personas distribuidas en 12 países de América.

SONDA ha participado en una variada gama de proyectos de distinta complejidad y envergadura, todos con una alta dosis de ingeniería, algunos de los cuales han sido pioneros y de gran impacto en la calidad de vida de las personas. En todos ellos, su núcleo central ha sido el uso de la tecnología con todas sus componentes de diseño, ejecución, operación y servicios. Solo como una pequeña muestra y a modo indicativo, podemos mencionar entre otros, el Sistema de Monitoreo de Contaminantes Ambientales de la ciudad de Santiago desarrollado en los años 80, la automatización de bancos en Chile y otros países, el sistema automatizado de control de tráfico en las ciudades de Santiago y Sao Paulo llevado a cabo a mediados de los años 90, la automatización del Servicio de Registro Civil para la emisión de documentos de identidad y pasaportes en Chile. También la operación tecnológica del sistema de transporte urbano en Santiago, algunos de cuyos componentes se han implantado posteriormente en otros países de América Latina, así como el

sistema de trazabilidad ganadera en Uruguay, país donde la carne es su principal producto de exportación, o la provisión de conectividad para el Estado de Mato Grosso do Sul en Brasil.

Mediante el uso de la ingeniería, donde miles de profesionales chilenos y de otros países han participado, SONDA ha sido un actor relevante en la incorporación de tecnología en empresas e instituciones en América Latina, contribuyendo así efectivamente a la modernización y mejora de productividad de nuestra región.

Cree que uno de los mayores aportes de SONDA ha sido su estilo de administración. Ha procurado ser una empresa donde la vocación de servicio a los clientes sea la fuerza vital, donde las personas se valoren por lo que son, donde se desarrollen afectos, donde se progrese potenciando talentos y habilidades más que eliminando defectos, donde los buenos hábitos se impongan a la necesidad de reglas, donde las costumbres se rijan por la sobriedad y sencillez, y donde la autoridad se ejerza a través de una estructura lo más plana posible por medio de la sintonía de criterios.

Además de SONDA, Andrés ha participado en otros negocios donde la ingeniería ha estado en el foco de su quehacer. Tal es el caso de la Constructora SalfaCorp, la mayor empresa del rubro de Chile, la cual actualmente preside, o el desarrollo inmobiliario Las Tacas en el norte del país.

Desde el punto de vista de nuevos negocios emprendidos, cita a la AFP Modelo, iniciativa que se creó en 2007 partiendo

de cero y en poco más de una década se convirtió en la mayor administradora de fondos de pensiones del país. También ha estado presente en negocios en otros sectores de la actividad económica, en los que disciplinas afines con la ingeniería han sido parte de su accionar, como la salud, la banca, la salmonicultura, o la purificación ambiental.

Con lo anterior, no hay duda que su actividad profesional hacia la gestión empresarial y el desarrollo de negocios se ha nutrido de su vocación original por la ingeniería, la que fue madurando en el transcurso del tiempo.

En el campo de la gestión confluyen, además de las herramientas propias de la ingeniería, otras disciplinas como la economía, las ciencias, la filosofía, el derecho o las comunicaciones, lo que le permitió tener un conocimiento mucho más integral del entorno en que se está inserto como personas y como empresas.

En su trayectoria, Andrés ha recibido numerosos premios y reconocimientos, como el año 2024, en que el Instituto de Ingenieros de Chile le otorgó el Premio “Medalla de Oro”.

A las nuevas generaciones de ingenieros, le nace decirles que reflexionen sobre la parábola de los talentos. Cualquier persona que estudia ingeniería tiene capacidades intelectuales que le permitirán desenvolverse dentro de un sinnúmero de opciones. El llamado debe ser a reconocer y valorar los talentos recibidos y potenciarlos, poniéndolos al servicio de los demás para ayudar a construir un país y un mundo mejor.



RECONOCIMIENTO AL SEÑOR RAÚL URIBE SAWADA

El señor Raúl Uribe Sawada fue director del Departamento de Ingeniería Matemática (DIM) de la Universidad de Chile entre 1975 y 1980, periodo en el que fue testigo de su nacimiento y evolución. Este hito es uno de sus grandes logros, al ser reconocida la Ingeniería Matemática como una carrera de Ingeniería Civil.

Como socio del Instituto de Ingenieros de Chile desde 1959, y luego miembro del directorio, tuvo una intensa actividad en diversos periodos, y participó de todas las publicaciones: primero como director y luego como Editor de la Revista Chilena de Ingeniería y de los Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, por más de 30 años, en forma ininterrumpida y completamente *ad-honorem*. Actualmente, es miembro del Consejo Consultivo de la corporación.

En su labor como Editor, revisó todos los Informes de las comisiones de trabajo que se publican en la revista, tarea llena de esfuerzo personal. En dos oportunidades, el directorio del Instituto calificó su trabajo como una contribución notable a la mantención de su patrimonio, otorgándole en 2010 un Diploma de Honor por Servicios Prestados al Instituto de Ingenieros de Chile, y en 2014, el Premio al Ingeniero por Acciones Distinguidas.

Desde que ingresó a la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile en 1954, dio inicio a su prolongada y extraordinaria actividad docente, como Ayudante, primero, para ir escalando posteriormente a Profesor de Cátedra, a Director del Departamento de Matemáticas y Computación de la Facultad, y a Director Académico de la Facultad. Entre las numerosas gestiones que realizó en estos cargos, destacan las tareas de revisar los planes de estudio de enviar académicos a doctorarse en el exterior y de adentrarse profundamente en la administración universitaria. También ejerció la docencia en diversas instituciones privadas, sin abandonar su cátedra en su alma máter, la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile.

Nunca olvidó mencionar que su labor docente fue el producto de los conocimientos impartidos por sus profesores, muy especialmente, por los que fueron sus mentores: Domingo Almendras, Rodrigo Flores, Francisco Javier Domínguez y



Arturo Arias, de quienes guarda entrañables recuerdos.

Como ingeniero sirvió en Endesa, en diversas instancias técnicas y administrativas, desarrollando un sistema computacional analítico de control de costos de la ingeniería, para grandes computadores centrales. Raúl Uribe fue designado para administrar el sistema, como jefe de un Departamento de Control de Gestión.

Comisionado por Endesa, perfeccionó sus conocimientos y competencias en temas de gestión, en *Electricité de France* y en *Kaiser Engineering, Duke Power, Ohio Electricity Co.* en Estados Unidos.

Cuando Endesa pasó al área privada y se dividió en varias empresas subsidiarias, la rama de Ingeniería pasó a formar la empresa Ingendesa, en la cual ese sistema de control de gestión resultó clave para el manejo financiero de la nueva institución.

Años más tarde, emigró al Ministerio de Obras Públicas a trabajar en la Dirección de Riego, actualmente Dirección de Obras Hidráulicas, con lo que retorna a su especialidad primitiva. Le cupo una activa participación en el proyecto y construcción de las obras de riego del Proyecto Laja-Diguillín y en la Inspección Fiscal de varios contratos. De allí en adelante se ha desempeñado como Consultor privado.

Raúl Uribe es una persona reservada y de perfil más bien bajo. Amante de la buena literatura, fanático de la ópera, aficionado al buceo, deporte que aprendió de adulto y que suele practicar con su hijo.

Hoy abandona su labor de Editor de la Revista Chilena de Ingeniería y de los Anales del Instituto de Ingenieros de Chile. Su alejamiento no pasará inadvertido. Otras personas tomarán el timón de esta nave, de manejo duro y difícil y, sin duda, tendrán una elevada vara de referencia, pero tenemos plena seguridad de que contarán con su guía y apoyo, lo que se deduce de su trayectoria, llena de cualidades profesionales y humanas que lo acompañarán siempre, con las que ha prestado un servicio permanente al Instituto y al país.

Mucha suerte querido colega y amigo, en cualesquiera de las actividades a las que destinarás tu tiempo.

ISSN 0716 - 2340



**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 137, N° 1 - ABRIL 2025

“Uno de los pensamientos que más ha preocupado al Instituto de Ingenieros, desde su fundación, ha sido la creación de un organo que lo ponga en relación con la sociedad, a cuyos intereses trata de servir, i cada día que pasa nos hace ver más i más la necesidad que la corporación tiene de consignar en un periódico las ideas que surjan i que se elaboren en su seno, referentes a los multiplicados i variadísimos ramos de la ingeniería.

En esta virtud, no porque nuestro periódico sea especialmente el órgano del Instituto, dejará de serlo también del país en general, i léjos de esto, creemos obrar en consonancia con nuestro propósito, ofreciendo sus columnas a las personas ilustradas i de buena voluntad que nos honren con el precioso continjente de ideas útiles”.

(Anales del Instituto de Ingenieros. Tomo 1, Año 1, 1888).

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 137, N° 1, abril de 2025

Contenido

DESARROLLO DE UNA MÁQUINA PRE-FISURADORA PARA PROBETAS SE(B) EN ENSAYOS DE MECÁNICA DE FRACTURAS.

Egon Delgado Ramírez

Pág. 1

MEZCLAS DE HORMIGÓN G30 CON AGREGADOS DE TERFTALATO DE POLIETILENO (PET) EN REEMPLAZO PARCIAL DE ARENAS PARA ACERAS.

Yasna P. Segura Sierpe; Eduardo I. Beltrán Henríquez; Manuel J. Manríquez Figueroa; Jorge Villarroel Ortega

Pág. 7

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO MULTIDISCIPLINARIO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA RECUPERAR ENERGÍA TÉRMICA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE LA CALDERA. CASO DE ESTUDIO

Ernesto E. Palacios-Valenzuela, Yayne Beltrán-Guilarte, Sebastian A. Añazco-Barría

Pág. 16

Editora

Ximena Vargas Mesa, Directora del Instituto de Ingenieros de Chile

Comité Editorial

Raúl Benavente G., Sociedad Chilena de Educación en Ingeniería (SOCHEDI)

Aldo Tamburrino T., Académico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile

Viviana Meruane N., Directora del Instituto de Ingenieros de Chile

Los Anales del Instituto estarán dedicados a la presentación de trabajos técnicos en el área de la Ingeniería y ramas afines, para lo cual acepta colaboraciones tanto del país como del extranjero.

Se publicarán aquellos artículos que, a juicio del Comité Editorial, contribuyan al desarrollo o difusión del conocimiento, de técnicas y métodos o de aplicaciones de importancia en la Ingeniería. Artículos de índole expositiva que unifiquen resultados dispersos o que den una visión integrada de un problema o de una puesta al día de una técnica o área, serán bienvenidos. Del mismo modo, ensayos sobre temas de interés para la profesión como perspectivas educacionales, históricas o similares.

DESARROLLO DE UNA MÁQUINA PRE-FISURADORA PARA PROBETAS SE(B) EN ENSAYOS DE MECÁNICA DE FRACTURAS

DEVELOPMENT OF A PRE-CRACKING MACHINE FOR SE(B) SPECIMENS IN FRACTURE MECHANICS TESTING

Dr. Egon Delgado Ramírez ¹

RESUMEN

Este estudio presenta el diseño, desarrollo y validación de un dispositivo pre-fisurador, integrado a un torno universal, destinado a la preparación de probetas tipo SE(B) para ensayos de mecánica de fractura. La implementación de este mecanismo en la torreta porta herramienta del torno permite la generación controlada. Se realizaron pruebas preliminares en probetas de geometría SE(B) de bronce de hélices naval (5x10 mm) y se llevó a cabo una caracterización comparativa cualitativa con pre-fisuraciones obtenidas en una máquina de tracción universal servo hidráulica, específicamente diseñada para esta finalidad. Los resultados indicaron que la máquina desarrollada cumple con los criterios normativos de mecánica de fractura, demostrando su viabilidad y eficacia para la preparación de probetas en estudios experimentales avanzados, esta máquina cuenta actualmente con una patente otorgada por el INAPI.

ABSTRACT

This study presents the design, development, and validation of a pre-cracking device integrated into a universal lathe, intended for the preparation of SE(B) specimens for fracture mechanics testing. The implementation of this mechanism in the lathe's tool post enables controlled crack generation. Preliminary tests were conducted on SE(B) specimens of naval propeller bronze (5x10 mm), followed by a qualitative comparative characterization against pre-cracks obtained using a servo-hydraulic universal testing machine specifically designed for this purpose. The results indicated that the developed machine meets the standard fracture mechanics criteria, demonstrating its feasibility and effectiveness for specimen preparation in advanced experimental studies. This machine currently holds a patent granted by INAPI.

¹ Profesor asistente Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Magallanes. egon.delgado@umag.cl

1. Introducción

La mecánica de fractura es una disciplina crucial en la evaluación del comportamiento de materiales estructurales bajo condiciones de carga críticas, proporcionando herramientas fundamentales para el diseño y la predicción de fallas en componentes industriales. En los ensayos experimentales, la pre-fisuración controlada de probetas resulta esencial para garantizar la iniciación homogénea y reproducible de la grieta, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Convencionalmente, la pre-fisuración se realiza mediante máquinas de tracción servo hidráulicas, diseñadas para inducir fisuras mediante cargas cíclicas controladas. Existen variados equipos para llevar a cabo ensayos de resistencia en probetas sobre las que se necesita conocer su comportamiento ante diversas solicitaciones de cargas, ya sea a la compresión como a la tracción [1]. La mayoría de estos equipos tienen un valor considerable, lo que hace de ellos un bien difícil de alcanzar para ciertas entidades en que su presupuesto es limitado, como lo son universidades, institutos y centros de investigación que no cuentan con los recursos suficientes.

Por los motivos antes expuestos, muchos de estos centros se enfrentan a la imposibilidad de pre-fisurar probetas, que son requeridas posteriormente para evaluar la tenacidad al crecimiento estable de fisuras en materiales a través de ensayos de mecánica de fractura. Así la disponibilidad de estas máquinas puede ser limitada debido a su alto costo y requerimientos operacionales. En este contexto, el presente trabajo propone una alternativa innovadora basada en la adaptación de un torno universal para la generación de fisuras en probetas SE(B).

2. Diseño y Construcción de la Máquina Pre-Fisuradora

El dispositivo pre-fisurador desarrollado consiste en un sistema de sujeción y aplicación de carga integrado a la torreta porta herramienta de un torno universal [2]. El diseño se basa en un travesaño de alta rigidez que sostiene los dos puntos de apoyo estáticos de la probeta, la cual se encuentra sujeta en una configuración de tres

puntos de apoyo (ver Figura 3 y Figura 4). El tercer punto de apoyo es el encargado de generar la carga cíclica necesaria para inducir la pre-fisuración, lo que se logra mediante una leva excéntrica calibrable montada en el plato de cuatro mordazas del torno.

El funcionamiento del sistema se basa en la rotación del plato del torno, lo que provoca el desplazamiento cíclico del tercer punto de apoyo, aplicando una carga variable en la probeta debido a que el desplazamiento es constante. A medida que la fisura crece, la carga aplicada disminuye progresivamente, favoreciendo el crecimiento controlado de la grieta. Este mecanismo permite obtener fisuras con una pequeña región de deformación plástica en la punta de la grieta, manteniendo un valor de factor de intensidad de tensiones (**K**) bajo, en conformidad con los requisitos de la norma ASTM E1820 [3].

Adicionalmente, se diseñó un sistema para la medición de la carga aplicada mediante strain gauges, integrados en una celda de carga específicamente desarrollada para este propósito. La adquisición de datos de la célula de carga se realiza mediante adquirentes de la marca NATIONAL INSTRUMENTS modelo NI 9237. El diseño de la celda fue optimizado mediante simulaciones en software de elementos finitos, asegurando la correcta ubicación de los strain gauges para una medición precisa (Figura 2). Asimismo, se implementó un sistema de conteo de ciclos, el cual permite registrar el número exacto de cargas aplicadas durante el proceso de pre-fisuración, dato fundamental en el análisis del crecimiento de la fisura y la caracterización del comportamiento del material.

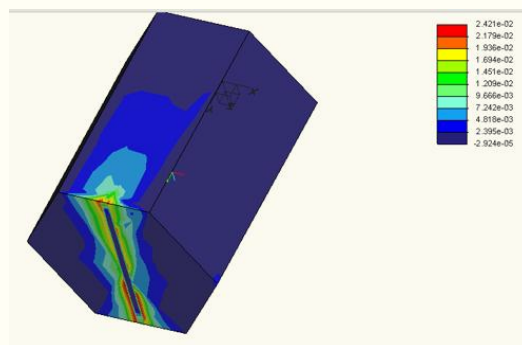


Figura 1.- Primer diseño de célula de carga.

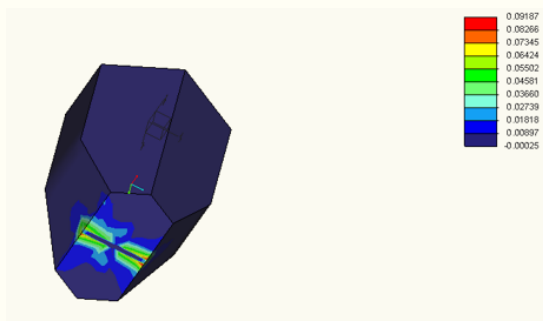


Figura 2.- Análisis de elementos finitos sobre la base utilizada como celda de carga optimizada.

El dispositivo ha sido diseñado para garantizar la uniformidad y reproducibilidad de la fisura, minimizando efectos indeseados de deformación plástica en la zona afectada.

Los componentes principales pueden ser vistos en anexo.

3. Metodología Experimental

Para evaluar la eficacia del dispositivo, se llevaron a cabo ensayos experimentales preliminares utilizando probetas de bronce de hélices naval con dimensiones normalizadas de 5x10 mm. (ancho y alto) con longitud de 60mm (ver Figura 5). Se realizaron pre-fisuraciones mediante el dispositivo desarrollado y, en paralelo, se obtuvieron fisuras de referencia utilizando una máquina de tracción universal servo hidráulica marca Instron de 100kN facilitada por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de la Frontera. Los ensayos fueron realizados con cargas cíclicas de 20hz.

Las probetas fueron sometidas a un análisis comparativo mediante microscopía óptica y técnicas de análisis de imagen, con el objetivo de evaluar la morfología de la fisura, su uniformidad y la presencia de posibles efectos de endurecimiento localizado o deformación plástica. Se consideraron criterios como la longitud de la fisura, la geometría de la punta de grieta y la homogeneidad del crecimiento de la fisura inicial.

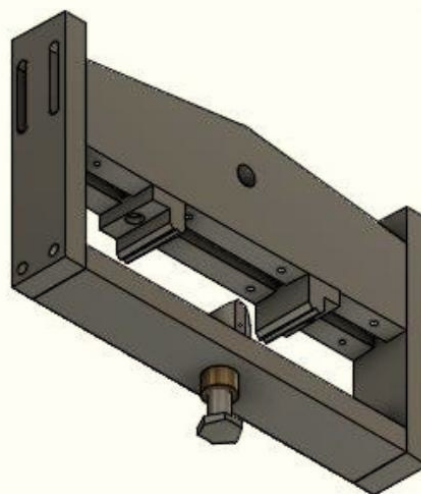


Figura 3.- Dispositivo adaptado a torno universal. (esquema extraído de patente [2])

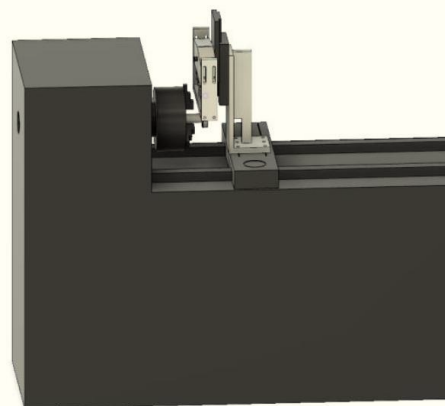


Figura 4.- Esquema de dispositivo adaptado a torno. (esquema extraído de patente[2])

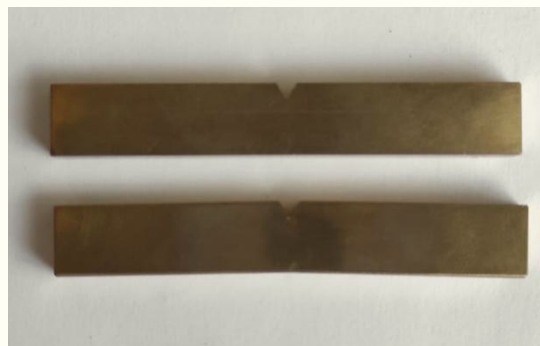


Figura 5.- Probetas geometría SE(B) dimensiones 5x10mm.

4. Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos indican que la pre-fisuración generada mediante la adaptación al torno universal es comparable, en términos de morfología y distribución de esfuerzos, a la obtenida con la máquina de tracción universal (Figura 6). Se observó que las fisuras presentaban una longitud controlada y una propagación homogénea, cumpliendo con los estándares requeridos para la realización de ensayos de mecánica de fractura [4].

Asimismo, el análisis de las superficies de fractura reveló que las fisuras generadas con el dispositivo desarrollado presentan características consistentes con una pre-fisuración efectiva, sin evidencias significativas de endurecimiento localizado o alteraciones microestructurales adversas.

Estos resultados confirman la viabilidad del sistema como una alternativa accesible y eficaz para la preparación de probetas en estudios avanzados de mecánica de fractura.



Figura 6.- Superficie de fractura después de quebrar las probetas. Lado izquierdo realizado con dispositivo patentado, lado derecho realizado con máquina servo-hidráulica.

5. Conclusiones

Se ha diseñado, construido y validado una máquina pre-fisuradora basada en la adaptación de un torno universal, proporcionando una solución eficiente y de

bajo costo para la generación de fisuras en probetas SE(B). La comparación con pre-fisuraciones obtenidas mediante equipos convencionales indica que el dispositivo cumple con los requisitos normativos y experimentales necesarios para estudios de mecánica de fractura.

Los resultados preliminares sugieren que la implementación de este sistema podría extenderse a otras configuraciones de probetas y materiales, abriendo nuevas posibilidades para la optimización de ensayos experimentales en mecánica de fractura. Futuros estudios explorarán la integración de técnicas de control numérico para mejorar la precisión del proceso y ampliar su aplicabilidad en distintos contextos industriales y académicos.

Agradecimientos

Se agradece al Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Magallanes por su apoyo al proyecto desarrollado.

Asimismo, se expresa gratitud a los colegas de la Universidad de La Frontera, Ricardo Alzugaray y Jorge González, por su colaboración en la realización de los ensayos de fatiga en la máquina de tracción universal de su laboratorio y por el tiempo dedicado a este estudio.

Bibliografía

- [1] Guimarães VA, Hein LRO, Zangrandi Filho J. Sistema de baixo custo para nucleação de pré-trincas por fadiga em corpos de prova de tenacidade à fratura. Mater Res 2001;4:205–9. <https://doi.org/10.1590/s1516-14392001000300011>.
- [2] Delgado Ramírez ER. Herramienta para torno universal que permite efectuar ensayo sobre una probeta para medir su resistencia. 69897, 2024.
- [3] ASTM International. E1820 – 20

Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. 2020. <https://doi.org/10.1520/E1820-08>.
[4] Delgado Ramírez ER, Perez Ipiña JE, Castrodeza EM. Analysis of the S

method for geometries where η depends on a/W . Eng Fract Mech 2021;241:107416. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107416>.

Anexo

Imágenes del dispositivo

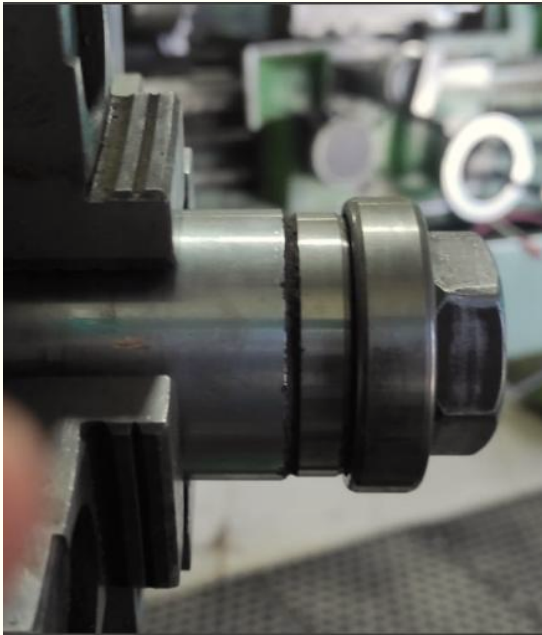


Figura 7.-Excéntrica generadora de movimiento cíclico para aplicar carga variable.



Figura 8.- Conjunto de soporte en 3 puntos.



Figura 9.- Travesaño carga en 3 puntos.



Figura 10.- rodillo apoyo central, diámetro de acuerdo con norma ASTM E1820.



Figura 11.- Celda de carga diseñada para medir carga aplicada.

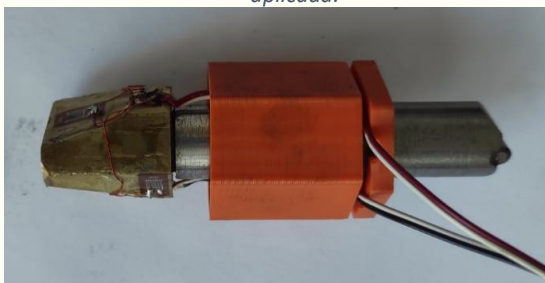


Figura 12.- Disposición de strain gauges de acuerdo a análisis realizado mediante elementos finitos.



Figura 13.- Strain gauge para medir la deformación en el sentido de la carga.



Figura 14. Sistema para contabilizar los ciclos y célula de carga adaptada en el apoyo que genera la carga cíclica.

MEZCLAS DE HORMIGÓN G30 CON AGREGADOS DE TERFTALATO DE POLIETILENO (PET) EN REEMPLAZO PARCIAL DE ARENAS PARA ACERAS.

Yasna P. Segura Sierpe¹; Eduardo I. Beltrán Henríquez²; Manuel J. Manríquez Figueroa³; Jorge Villarroel Ortega⁴
Departamento de Ingeniería en Construcción, Universidad de Magallanes, Chile.

RESUMEN

El estudio evalúa el uso de agregados de PET en hormigón para aceras, con el objetivo de fomentar la sostenibilidad en la construcción. Se analizaron la resistencia a la compresión y flexión, la trabajabilidad y la absorción de agua, buscando una proporción óptima que minimizara la pérdida de resistencia. Los resultados indicaron que sustituir el 7,5 % de los agregados convencionales por PET redujo la resistencia a la compresión en un 12,2 %, manteniéndose en niveles aceptables. La investigación concluye que esta alternativa es viable y sostenible, ya que mejora la durabilidad de las estructuras y reduce el impacto ambiental del hormigón.

Palabras claves— Residuos plásticos, teraftalato de polietileno, PET, hormigón verde, pavimentación.

ABSTRACT

The study evaluates the use of PET aggregates in concrete for sidewalks to promote sustainability in construction. Compressive and flexural strength, workability, and water absorption were analyzed to determine an optimal proportion that minimizes strength loss. Results indicated that replacing 7.5% of conventional aggregates with PET reduced compressive strength by 12.2%, remaining within acceptable levels. The research concludes that this alternative is viable and sustainable, as it enhances the durability of structures and reduces the environmental impact of concrete.

Keywords – Concrete, Laboratory Essays, Paving, Plastic Bottles.

¹ PhD. in Construction Engineering. Contacto: yasna.segura@umag.cl

² Ingeniero Constructor. Contacto: ebeltran@umag.cl

³ PhD. Civil Engineering. Contacto: manuel.manriquez@umag.cl

⁴ PhD. Civil Engineering. Contacto: jorge.villarroel@umag.cl

1. INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1920, los materiales plásticos han penetrado eficazmente todos los aspectos de la vida moderna, desde los microchips de los ordenadores hasta las bolsas de la compra.

A nivel mundial, y en Chile, existe una fuerte campaña contra los plásticos de un solo uso, con el objetivo de eliminar del mercado aquellos envases y utensilios de vida corta que, tras un uso puntual, se convierten rápidamente en desechos. Sin embargo, algunos plásticos pueden ser reciclados y aprovecharse en diversas industrias, como es el caso del tereftalato de polietileno (PET). Este material no solo es completamente reciclable, sino que también sustenta una creciente industria de reciclaje. Su eliminación no solo incrementaría la contaminación, sino que también representaría un desperdicio de recursos y dinero [1].

Desde el punto de vista químico, el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol, perteneciendo al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres, al ser un termoplástico impermeable y no biodegradable, ha favorecido su desarrollo en la industria textil y en la fabricación de diversos envases, especialmente botellas, bandejas y láminas [2].

En el sector de la construcción, la búsqueda de materiales alternativos para reemplazar los agregados en el hormigón es una prioridad. Este estudio evalúa el potencial del PET como una opción viable dentro de la industria. Actualmente, el consumo anual de hormigón supera los 10.000 millones de toneladas, mientras que el uso global de plásticos se ha multiplicado por más de 20 en los últimos 50 años, alcanzando los 380 millones de toneladas en 2018 solo en Europa [3], [4]. La incorporación de PET en infraestructuras de hormigón podría ser una estrategia efectiva para mejorar la sostenibilidad [5], [6]. En Chile, durante 2023, el consumo de plástico alcanzó 1.245 millones de toneladas, de las cuales un 21 % se destinó al sector de la construcción.

El uso de plásticos reciclados ha sido estudiado como una alternativa eficaz para mejorar las propiedades del hormigón y el mortero. Según el estudio de Ismail Z. et al., se llevaron a cabo 86 ensayos y 254 pruebas para evaluar la eficacia del reciclaje de residuos plásticos en la fabricación de hormigón. En la investigación, se

consideraron proporciones de sustitución parcial de arena del 0%, 10%, 15% y 20%. Los resultados indicaron que la resistencia a la compresión de todas las mezclas de hormigón tiende a disminuir en comparación con las mezclas patrón a medida que aumenta la proporción de residuos plásticos, independientemente de la edad de curado. Esta reducción en la resistencia puede atribuirse a la menor adherencia entre la superficie del plástico reciclado y la pasta de cemento [7].

Según el estudio de M. Frigione (2010), se analizó el efecto de la sustitución parcial del árido fino en un 5% en peso por partículas de residuos de botellas de PET sin lavar (WPET) en mezclas de hormigón; evaluando su impacto en la trabajabilidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción. Los resultados mostraron una ligera reducción en la resistencia a la compresión, no superior al 2%, mientras que la resistencia a la tracción disminuyó entre un 1,6% y un 2,4%. En cuanto a la trabajabilidad, no se observaron cambios significativos [8].

Dawood et al. investigaron las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con residuos de PET triturados como sustitución parcial de los áridos finos en proporciones del 5% al 20%. Los resultados indicaron que la trabajabilidad del hormigón disminuía a medida que aumentaba el contenido de PET, registrándose una reducción del 62,5% en la mezcla con un 20% de PET en comparación con el hormigón de referencia. Esta disminución se atribuyó a la mayor superficie específica de las partículas de PET en comparación con las de arena. Asimismo, se observó que la resistencia a la compresión aumentaba cuando la sustitución de PET estaba entre el 0% y el 15%, alcanzando un incremento máximo del 7,5% con un 12% de PET respecto al control. Sin embargo, a partir de este porcentaje, la resistencia comenzó a reducirse [9], [10].

2. MÉTODO

La resistencia del hormigón dependerá de sus propiedades y de la presencia de agentes externos que generen ataque al elemento estructural.

Para obtener un hormigón resistente, resulta necesaria la implementación de medidas adecuadas en el diseño de mezcla, la fabricación las correctas prácticas de colocación, compactación, curado y protección del hormigón.

Los requisitos de para confeccionar hormigón de acuerdo a la exposición, se encuentra especificado en la NCh170:2016 [11].

Con respecto a la nomenclatura del hormigón, de acuerdo a lo que se establece en la NCh170:2016 para la ciudad de Punta Arenas, corresponde a G30 (90) 25/5 F1 S1 C2-B P0. Esto quiere decir lo siguiente:

- **G30:** Grado de resistencia hormigón sometido a compresión, 30 MPa
- **(90):** Nivel de confianza del material del 90 %, con una fracción defectuosa del 10 %.
- **25:** Tamaño máximo nominal del árido, expresado en mm
- **5:** Asentamiento del hormigón, expresado en cm (con una tolerancia de +/- 2 cm).
- **F1:** Hormigón expuesto a congelación y deshielo, ocasionalmente expuesto a humedad.
- **C2-B:** Hormigón expuesto a agentes que provocan corrosión de grado severo, producto de cloruro como aire salino.
- **P0:** Hormigón en ambiente seco o en contacto con agua pero que no requiera baja permeabilidad, sin restricción con respecto a profundidad de penetración de agua.

Los materiales a utilizar para la realización de hormigón deben corresponder a los que se especifica en la NCh170:2016, de los cuales corresponde:

- Agua potable, según NCh1498:2012 [12]
- Cemento Portland Puzolánico CPP40 marca Comodoro, según NCh148:1968 [13]
- Grava rodada, chancada y gravilla, según NCh163:2013 [14]
- Arena normal, según NCh163:2013 [14]
- PET triturado, como material de reemplazo en arena.
- Incorporador de aire, según NCh2182:2010 [15]
- Plastificante, según NCh2182:2010 [15]

Previamente a la confección de hormigón, se caracteriza los materiales, específicamente el árido grueso, arena y PET, que deben cumplir con los requisitos reflejados en la Tabla 1 [16], [17], [18], [19], [20].

Tabla 1. Requisitos de áridos según NCh163:2013.

Requisitos		Valores límites		Normas
		Árido Grueso	Árido Fino	
1. Material fino menor a 0,075 mm	% máx.	1	5	NCh 1223
2. Absorción de agua (porosidad)	% máx	2	3	NCh 1117
3. Resistencia al desgaste. Máquina de Los Ángeles	% máx	35	-	NCh 1369
4. Partículas desmenuzables	% máx	5	3	NCh 1327
5. Resistencia a la desintegración por sulfato de sodio	% máx	10	10	NCh 1328
6. Índice de trituración Para hormigón sometido a desgaste	% máx	20	4	Anex o B NCh 163

Se tiene la granulometría, realizada de acuerdo a la NCh165:2009, de los áridos gruesos en la Fig. 1, la arena normal en la Fig. 2 y el PET en la Fig. 3. Cabe destacar que, en el caso del PET, el material no está dentro del rango de ninguna denominación de áridos finos, por lo cual es un factor influyente a considerar en los resultados de las mezclas de hormigón [21].

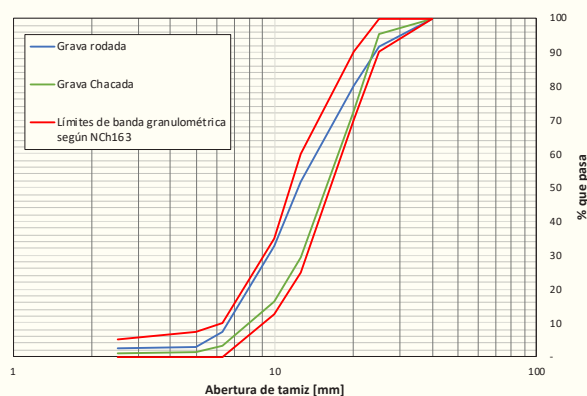


Figura 1. Curva granulométrica de los áridos rodado y chancado.

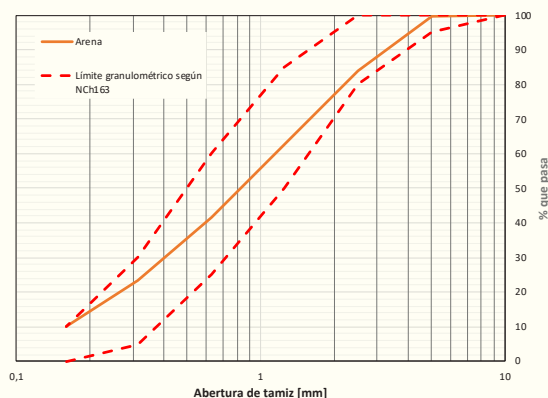


Figura 2. Curva granulométrica de la arena normal.

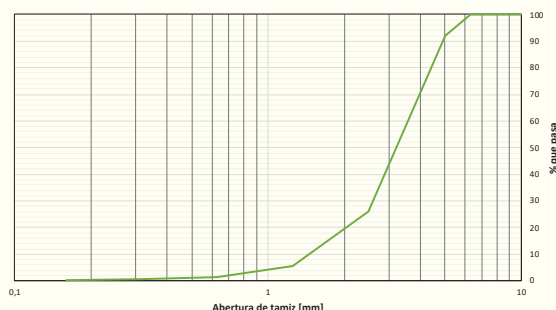


Figura 3. Curva granulométrica de PET.

A continuación, en la Tabla 2 se puede apreciar los resultados obtenidos de los distintos ensayos de caracterización de áridos, cumpliendo así lo que señala la NCh163:2013 [14].

Tabla 2. Resultados de la caracterización de los áridos.

Ensayos	Grava		Arena	PET
	Chancado	Rodado		
Material fino menor a 0,075 mm	0,9%	0,5%	3,0%	1,0%
Absorción de agua (porosidad)	1,4%	0,7%	2,6%	0,3%
Resistencia al desgaste. Máquina de Los Ángeles	27,7%	31,7%	---	---
Partículas desmenuzables	0,6%	4,7%	2,9%	---
Resistencia a la desintegración por sulfato de sodio	1,2%	2,6%	3,9%	1,3%
Índice de trituración Para hormigón sometido a desgaste	16,5%	8,4%	2,7%	0,0%

Una vez teniendo la caracterización de áridos, se procede a calcular las cantidades en kilogramos para la confección de 1 m³, que se observan en la Tabla 3, obtenida a través del Método Faury-Joisel [22].

Tabla 3. Material para la confección de 1 m³ de hormigón.

Material	Unidad	Cantidad
Grava rodada	kg	555,4
Grava chancada	kg	231,1
Gravilla	kg	160,1
Arena	kg	810,2
PET	kg	367,7
Cemento	kg	332,6
Agua Total	ml	173,0
Plastificante	ml	1,663
Incorporador de aire	ml	0,333

En el Laboratorio Austro-UMAG se procedió a la preparación de 40 litros de hormigón, mediante el uso de la betonera modelo Deper 130 P para la confección de 5 probetas cilíndricas por mezcla, de acuerdo a la NCh1017:2009, teniendo las siguientes cantidades reflejadas en la Tabla 4 [23].

Tabla 4. Material para la confección de 40 lt de hormigón.

Material	0%	2,5%	5,0%	7,5%	10%
Arena (kg)	32,41	31,60	30,79	29,98	29,17
PET* (kg)	0,0	0,37	0,74	1,10	1,47
Rodada (kg)	22,22				
Grava chancada (kg)	9,24				
Gravilla (kg)	6,40				
Cemento (kg)	13,30				
Agua Total (ml)	6,93				
Plastificante (ml)	66,50				
Incorporador de aire (ml)	10,60				

* Nota: El PET es incorporado y la arena extraída del hormigón modificado, en relación a su densidad real por 1 m³.

De acuerdo a la Tabla 4, se tiene una cantidad estimada para cada material de acuerdo a su densidad en un volumen determinado, generando la confección de hormigón G30 en 0%; 2,5%; 5%; 7,5% y 10% de PET en reemplazo de arena.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para hormigón fresco, se tiene los resultados de los ensayos que se observan en la Tabla 5, realizado de acuerdo a la normativa correspondiente [24], [25], [26].

Como se observa en la Tabla 5, el asentamiento del hormigón aumenta a medida que se incorpora PET, por lo que se puede señalar que la absorción de agua es menor debido a que el plástico es impermeable y carente de porosidad, generando una mezcla más acuosa [27].

Tabla 5. Datos de hormigón fresco.

Descripción	0%	2,5%	5,0%	7,5%	10%
Densidad hormigón (kg/m ³) NCh1564	2.428	2.408	2.386	2.351	2.311
Asentamiento (mm) NCh1019	40	45	53	55	60
Temperatura hormigón (°C)	16,2	12,1	13,3	16,8	16,6
Temperatura ambiente (°C)	15,8	11,5	12,8	16,5	16,3
Contenido de Aire (%) ASTM C231	4,6	4,7	4,7	4,8	5,0

Para hormigón endurecido, se realizó ensayo a compresión, 2 probetas a los 7 días y 2 a 28 días, de acuerdo a la NCh1037:2009 [28], con su refrentado correspondiente según NCh1172:2009 [29]. Como se observa en la Tabla 6, a los 7 días de curado, presenta una disminución de resistencia a compresión a medida que se aumenta la incorporación de PET. Sin embargo, se produce un leve aumento de resistencia al 7,5 %, disminuyendo considerablemente una vez llegando al 10% de PET. En cambio, a los 28 días de curado, se presenta una disminución gradual de resistencia, quedando al límite del diseño en 7,5 % de PET, cayendo abruptamente al 10 % de incorporado.

Tabla 6. Resistencia mecánica a compresión a 7 y 28 d.

Edad	Rc (MPa)				
	0%	2,5%	5,0%	7,5%	10%
7 días	19,83	18,86	17,71	18,81	15,18
28 días	34,36	33,22	31,39	30,18	25,28

Para la muestra patrón se tiene una resistencia promedio de 19,8 MPa a los 7 días, que a medida que se incorpora PET, puede disminuir su resistencia hasta en un 22%, con un 10% de material de reemplazo. En el caso de la resistencia a compresión a 28 días, la muestra patrón posee una resistencia de 34,4 MPa, estando sobre el diseño que es 30 MPa, pero que va disminuyendo hasta en un 26,5 % al incorporar 10 % de PET, como se observa en la Figura 4.

La mezcla ideal que puede utilizarse corresponde hasta el 7,5 % de PET, ya que el material en un 10 % de reemplazo decae su resistencia en un 15,7 % con respecto a los 30 MPa de resistencia de diseño.

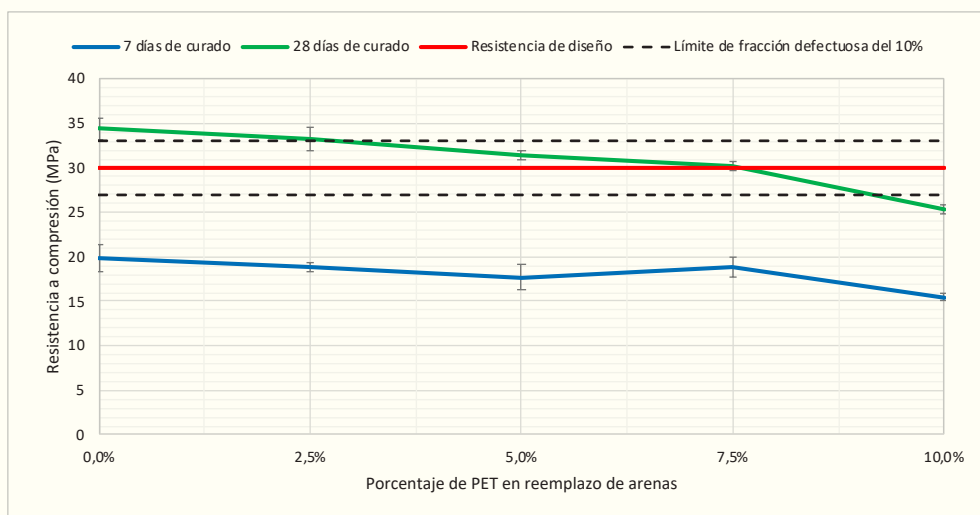


Figura 4. Resistencia mecánica a compresión de hormigones en proporción al porcentaje de PET a 7 y 28 días.

Por otro lado, se realizó de acuerdo a la NCh1170:2009 [30], el ensayo de flexión por hendimiento a la probeta restante de cada muestra 28 días de edad, que se refleja los resultados en la Figura 5, corresponde a 3,2 MPa, que se puede considerar un HF 3,0 según nomenclatura de resistencias de la NCh170:2016.

A medida que se le incorpora material de reemplazo, disminuye su resistencia hasta en un 33,3 % con 10 % de PET. Hay que considerar que la resistencia de diseño por flexión corresponde a 1/8 parte de la resistencia a compresión, es decir, 3,8 MPa, encontrándose en un 15,8% por debajo del valor de diseño y un 42,1% al 10% de PET incorporado.

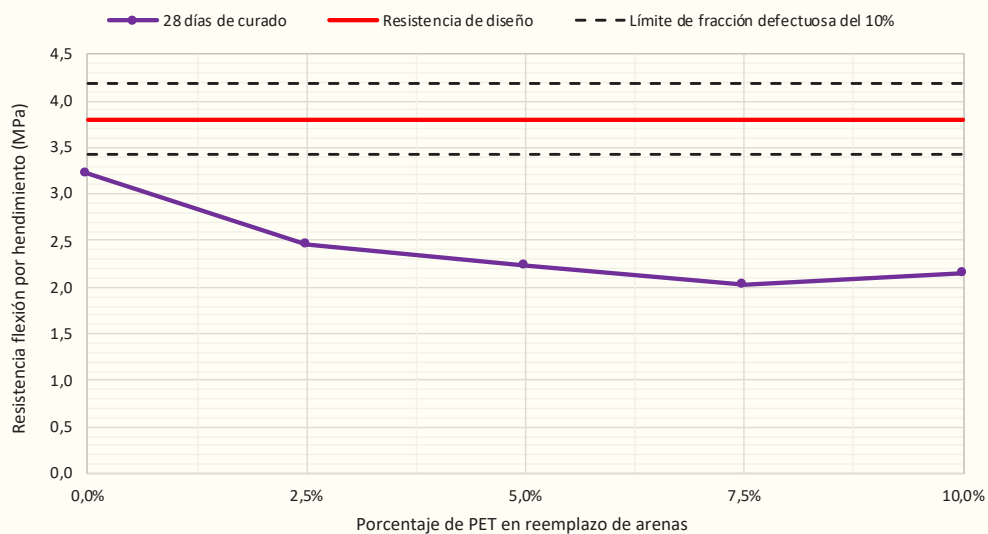


Figura 5. Resistencia mecánica a flexión por hendimiento de hormigones en proporción al porcentaje de PET a 28 días.

4. CONCLUSIONES

La investigación sobre la utilización de agregados de PET en mezclas de hormigón para la construcción de aceras ha arrojado resultados prometedores que apuntan hacia una alternativa sustentable y eficaz en la industria de la construcción. La introducción de plástico reciclado en la producción de hormigón no solo busca mejorar las propiedades físico- mecánicas de este material esencial, sino también reducir la huella ambiental asociada a su fabricación y promover la economía circular mediante la reutilización de desechos plásticos.

Uno de los aspectos más relevantes de este estudio es la dosificación de PET en las mezclas de hormigón, que a partir porcentajes del 2,5 % - 5,0 % - 7,5 – 10 %, se ha determinado que el óptimo es el 7,5% de reemplazo para lograr resultados satisfactorios. Esta proporción ha demostrado ser efectiva por lo que sugiere que la incorporación de PET puede fortalecer las estructuras de las aceras y prolongar su vida útil. No obstante, se observa una disminución en la resistencia a compresión a medida que se incrementa la cantidad de PET por encima de este porcentaje, lo que destaca la importancia de encontrar un equilibrio entre la sostenibilidad ambiental y las propiedades estructurales del hormigón.

[1] País Circular, «PET, el plástico que abunda en Chile pero que hoy se debe importar para sostener una industria de reciclaje clave para la Ley REP». [En línea]. Disponible en: <https://www.paiscircular.cl/consumo-y-produccion/pet-el-plastico-que-abunda-en-chile-pero-que-hoy-se-debe-importar-para-sostener-una-industria-de-reciclaje-clave-para-la-ley-rep/>

[2] Wikipedia, «Tereftalato de polietileno». [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno

[3] EuRIC AISBL, «Plastic Recycling Factsheet», 2020. [En línea]. Disponible en: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/euric_-_plastic_recycling_fact_sheet.pdf

Las propiedades observadas del hormigón patrón con respecto a los modificados, tanto física como mecánicas, han arrojado datos interpretativos. La densidad del hormigón fresco, inicialmente 2.428 kg/m³, disminuye hasta en un 4,8 %, generando de esta forma un hormigón más liviano. El asentamiento de 40 mm aumenta hasta en un 50 %, por lo que se señala una menor absorción de agua a causa del PET, generando una mezcla con más trabajabilidad. El contenido de aire, siendo 4,6 % aumenta hasta un 5 %, a causa de la incorporación PET, incrementado su permeabilidad.

El hormigón patrón, en el caso de la resistencia a compresión, corresponde a 34,4 MPa, lo cual el resultado fue satisfactorio en 3 de 4 hormigones modificados, que comienzan a disminuir su resistencia a medida que se incorpora el PET hasta en un 26,4% al 10% de agregado, y en un 15,7% con respecto a la resistencia de diseño de 30 MPa. Por otro lado, la resistencia a flexión por hendimiento, que es 3,2 MPa, si bien, está en un 15,8% y en 42,1% para el caso más desfavorable por debajo de la resistencia de diseño que es 3,8 MPa, no es un requisito para la confección de aceras según el CONETOP, además de considerar que se realizó una probeta por mezcla y a una edad de 28 días, siendo que la edad estándar es de 90 días.

REFERENCIAS

[4] S. Miller, M. Bolger, y L. Copello, «Reusable solutions: How governments can help stop single-use plastic pollution», 3Keel, Oxford, United Kingdom, 2022.

[5] S. Pratap Singh Rajawat, B. Singh Rajput, y G. Jain, «Concrete strength analysis using waste plastic as a partial replacement for sand», Mater. Today Proc., vol. 62, pp. 6824-6831, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.961.

[6] Md. J. Islam, Md. S. Meherier, y A. K. M. R. Islam, «Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete», Constr. Build. Mater., vol. 125, pp. 946-951, oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128.

[7] Z. Z. Ismail y E. A. AL-Hashmi, «Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement»,

Waste Manag., vol. 28, n.º 11, pp. 2041-2047, nov. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.

[8] M. Frigione, «Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete», Waste Manag., vol. 30, n.º 6, pp. 1101-1106, jun. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.

[9] A. O. Dawood, H. AL-Khazraji, y R. S. Falihi, «Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates», Case Stud. Constr. Mater., vol. 14, p. e00482, jun. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00482.

[10] M. E. Kangavar, W. Lokuge, A. Manalo, W. Karunasena, y M. Frigione, «Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement», Case Stud. Constr. Mater., vol. 16, p. e00934, jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00934.

[11] Instituto Nacional Normalización, NCh170:2016. Hormigón - Requisitos generales, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://ecommerce.inn.cl/nch170201658328>

[12] Instituto Nacional Normalización, NCh1498:2022. Hormigón y mortero - Agua de amasado - Requisitos, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://ecommerce.inn.cl/nch1498202283102>

[13] Instituto Nacional Normalización, NCh148:1968 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales, 1968. [En línea]. Disponible en: <https://ecommerce.inn.cl/nch148196840947>

[14] Instituto Nacional Normalización, NCh163:2013. Áridos para morteros y hormigones - Requisitos, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://ecommerce.inn.cl/nch163201345943>

[15] Instituto Nacional Normalización, NCh2182:2010. Hormigón y mortero - Aditivos - Clasificación y requisitos, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://ecommerce.inn.cl/nch2182201045661>

[16] Instituto Nacional Normalización, NCh1223:1977. Áridos para morteros y hormigones - Determinación del material fino menos a 0,080 mm,

1977. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afbda5061914006c38/embed/view/1223>

[17] Instituto Nacional Normalización, NCh1117:2010. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades reales y netas y de la absorción de agua de las gravas, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afbda5061914006c38/embed/view/nch1117>

[18] Instituto Nacional Normalización, NCh1369:2010. Áridos - Determinación de la resistencia al desgaste por abrasión e impacto - Método de la máquina de Los Angeles, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afbda5061914006c38/embed/view/1369>

[19] Instituto Nacional Normalización, NCh1327:1977. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de partículas desmenuzables, 1977. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afbda5061914006c38/embed/view/1327>

[20] Instituto Nacional Normalización, NCh1328:1977. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la desintegración - Método de los sulfatos, 1977. [En línea]. Disponible en: <https://ecommerce.inn.cl/nch1328197743106>

[21] Instituto Nacional Normalización, NCh165:2009. Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría., 2009. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afbda5061914006c38/embed/view/nch165>

[22] Videla, C., «Método de Faury, en dosificación de hormigones», Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://ingjeltoncalero.wordpress.com>

[23] Instituto Nacional Normalización, NCh1017:2009. Hormigón - Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento, 2009. [En línea]. Disponible en:

<https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch1017>

[24] Instituto Nacional Normalización, NCh1564:2009. Hormigón - Determinación de la densidad aparente del hormigón fresco, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/1564>

[25] Instituto Nacional Normalización, NCh1019:2009. Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch1019>

[26] ASTM International, ASTM C231:2014. Método de ensayo Normalizado de Contenido de Aire Del Concreto Recién Mezclado Mediante el Método por Presión., 2014. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com>

[27] Arapack, «¿Qué es el PET?» [En línea]. Disponible en: <https://www.arapack.com>

[28] Instituto Nacional Normalización, NCh1037:2009. Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch1037>

[29] Instituto Nacional Normalización, NCh1172:2010. Hormigón - Refrentado de probetas, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/1172>

[30] Instituto Nacional Normalización, NCh1170:2012. Hormigón - Ensayo de tracción por hendimiento, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch1170>

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO MULTIDISCIPLINARIO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA RECUPERAR ENERGÍA TÉRMICA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE LA CALDERA. CASO DE ESTUDIO.

OPTIMIZATION OF THE MULTIDISCIPLINARY DESIGN OF A HEAT EXCHANGER TO RECOVER THERMAL ENERGY FROM THE COMBUSTION GASES OF THE BOILER. STUDY CASE.

Ernesto E. Palacios-Valenzuela¹, Yayne Beltrán-Guilarte¹, Sebastian A. Añazco-Barria¹

RESUMEN

La contaminación del aire en las comunas de Llanquihue y Chiloé, Chile, ha aumentado sostenidamente en las últimas décadas por las emisiones que generan la combustión de madera, residencial, y la de petróleo, industrial. La relevancia del presente estudio radica en la posibilidad de diseñar sistemas térmicos óptimos capaces de hacer uso eficiente de la energía térmica contenida en los gases de escape de las calderas disminuyendo el consumo de combustibles fósiles y los niveles de gases contaminantes utilizando la herramienta matemática Optimización Multidisciplinaria del Diseño, MDO. Para mostrar el modelo se calcula el intercambiador de calor de la caldera de una planta procesadora de mejillones ubicada en Chonchi, Chiloé, y se comparan los resultados relativos a combustible y contaminantes con la situación actual. El diseño con el modelo propuesto disminuye en 7,6% el consumo mensual de combustibles y en 7,0% la emisión de gases de escape al medio ambiente.

Palabras claves: Modelo de optimización, caldera, intercambiador de calor.

ABSTRACT

Air pollution in the communes of Llanquihue and Chiloé, Chile, has increased steadily in recent decades due to the emissions generated by the combustion of wood, mainly residential and oil, basically industrial. The relevance of the present study lies in the possibility of designing optimal thermal systems capable of recovering and making efficient use of the thermal energy contained in the exhaust gases of the boilers reducing the consumption of fossil fuels and therefore the levels generated of polluting gases. For the design the mathematical tool Multidisciplinary Optimization of Design, MDO, is used. To show the model, the boiler heat exchanger of a mejillones processing plant located in Chonchi, Chiloé is calculated, and its results are compared in terms of fuel consumption and generation of pollutants contained in the chimney gases with the current situation. The design with the proposed model decreases 7,6 % monthly fuel consumption and 7,0% the emission of exhaust gases to the environment.

Keywords: Optimization model, boiler, heat exchanger.

¹ Universidad de Los Lagos, Puerto Montt, Chile.

Email: ernesto.palacios@ulagos.cl; yayne.beltran@ulagos.cl; alejandrosebastian.anazco@ulagos.cl.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la matriz energética de Chile está dominada por combustibles fósiles, es decir no renovables, tales como el petróleo, el carbón mineral y el gas natural, a lo que se suman grandes centrales hidroeléctricas. En la producción industrial predomina la generación de energía con la combustión de combustibles fósiles.

Los gases generados en este proceso son considerados una de las principales amenazas para el medio ambiente debido al contenido de óxidos de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (MP) presente en estos^[1]. Además, el excesivo uso de combustibles fósiles ha provocado un agotamiento de estos recursos no renovables, causando un continuo y acelerado crecimiento en los costos relacionados con la energía. La relevancia del presente estudio radica en la importancia de diseñar sistemas térmicos óptimos, para esta industria, que sean capaces de recuperar y hacer uso efectivo y eficiente de la energía térmica contenida en los gases de escape de las calderas. De esta forma disminuye el consumo de combustibles fósiles disminuyendo los niveles de emisión de gases contaminantes para el medio ambiente.

En el proceso de diseño de un intercambiador de calor (IC) hay dos tareas que se destacan i) clasificación y ii) dimensionamiento. En i) se determinan parámetros iniciales como la tasa de transferencia de calor, las temperaturas de entrada y de salida de los fluidos, las caídas de presión permisibles dentro del IC, etc.; mientras que en ii) se determina volumen, peso, superficie de transferencia, y otros parámetros que permiten cumplir con los requisitos especificados de temperatura y tasa de transferencia^[2].

La Optimización Multidisciplinaria del Diseño (MDO, por sus siglas en inglés *Multidisciplinary Design Optimization*), es una metodología formal que se centra en la aplicación de técnicas de optimización numérica para realizar el diseño de Sistemas Complejos de Ingeniería^[4], los cuales están compuestos por múltiples subsistemas interrelacionados entre sí^[5]. En la actualidad, existen diversos sistemas complejos de ingeniería diseñados utilizando la herramienta MDO, ejemplo: satélites^[6],

tuneladoras^[7], turbinas eólicas^[8], filtro de partículas diésel^[9]. El principio básico de esta metodología es que cada subsistema que compone al sistema afecta al resto de los subsistemas.

La solución de un problema de MDO se inicia con la descomposición del sistema en los subsistemas que lo componen. Dependiendo de la interrelación existente entre los subsistemas, la descomposición puede presentarse de múltiples formas, siendo las más comunes la Descomposición Jerárquica y Descomposición No Jerárquica^[10].

Entre las “estrategias particulares de MDO”^[4] se encuentran las arquitecturas que permiten la organización del análisis de las contribuciones numéricas al diseño del sistema a nivel de subsistemas, además de la declaración y formulación del modelo matemático (función objetivo, variables de diseño y de estado, restricciones y otros) y la técnica de optimización para lograr un diseño óptimo.

Dentro de estas estrategias, se encuentran las Arquitecturas Monolíticas (Formulación de problema de MDO de un solo nivel)^[10], las cuales son las más simples, ya que su análisis se encuentran a nivel de sistema. Dentro del marco de estas, la optimización mediante análisis y diseño simultáneo (SAND), se ha posicionado como una formulación alternativa a la optimización de análisis integrado (AAO), debido a que la aplicación de la última al diseño de sistemas de gran escala resulta demasiado difícil conceptualmente y de difícil resolución computacional.

La optimización mediante la arquitectura SAND permite el análisis de forma independiente por cada subsistema, facilitando su aplicación al diseño de sistemas complejos de ingeniería a gran escala^[10]. La principal ventaja, es que como no se necesita resolver de forma explícita o exacta el análisis disciplinario de los subsistemas en cada iteración, el problema de optimización puede ser resuelto muy rápidamente. A su vez, es una arquitectura que no se restringe únicamente a optimización de sistemas multidisciplinario, sino que también permite ser utilizado en modelos de programación matemática compuesto por una única disciplina^[4].

El principal objetivo de este trabajo consiste en obtener un modelo de Optimización Multidisciplinario de un Diseño de un IC de tubo y coraza para recuperar la energía térmica presente en los gases de escape de calderas.

En el caso de estudio se aplica el modelo desarrollado en el cálculo del intercambiador de tubo y carcasa de una caldera de una planta procesadora de Mejillones ubicada en la ciudad de Chonchi, Chiloé, comparando

los resultados con este con datos reales de la planta. En la aplicación se demuestra la efectividad del IC al aprovechar la energía térmica presente en los gases de escape de las calderas favoreciendo la reducción del costo de operación y energía eléctrica, así como la reducción de emanaciones al medio ambiente de gases y material particulado, disminuyendo la carga negativa provocada al medio ambiente.

ANÁLISIS MULTIDISCIPLINARIO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

El ciclo térmico general se inicia con el trabajo aportado por la bomba hidráulica que eleva la presión del agua de alimentación hasta la presión de trabajo de la caldera. El agua de alimentación eleva su temperatura al hacer ingreso y circular por el interior del IC instalado en el ducto de escape de la caldera (chimenea), debido al flujo de calor aportado por los gases de escape de combustión.

Una vez que el agua de alimentación sale del IC, ingresa a la caldera y cambia de fase de líquido

comprimido a vapor saturado, para ser utilizado de acuerdo con los requerimientos del proceso de la planta. El agua cambia de fase debido al flujo de calor que ceden los gases generados por la combustión del combustible utilizado por el quemador de la caldera. Una vez que salen estos gases por la chimenea se convierten en gases de escape de combustión. El ciclo es de tipo ciclo abierto, por ende, se omite el uso de condensador. El vapor es liberado al ambiente, que actúa como depósito de energía térmica.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

El IC por diseñar será de tubo y coraza, cuya finalidad es la recuperación de la energía térmica presente en los gases de escape de combustión de calderas evitando que ambos fluidos en el interior de éste se mezclen, Figura 1. Estos tipos de intercambiadores proporcionan como ventajas grandes áreas de transferencia térmica en proporción al volumen, altas presiones de trabajo entre los fluidos y facilidades de limpieza, mantenimiento y reemplazo de componentes en caso de falla^[2].

Se tendrán en consideración las siguientes especificaciones:

- i) No existe cambio de fase en los fluidos dentro del IC.
- ii) La disposición de los tubos de tipo rectangular (90°).
- iii) El banco de tubos se separa mediante deflectores para aumentar el número de pasos del fluido que circula por la coraza,

aumentando así el flujo de calor entre ambos fluidos.

- iv) El flujo másico del fluido a menor temperatura, $\dot{m}_R$, corresponde al agua de alimentación de la caldera, $\dot{m}_a$, y circulará por el interior del banco de tubos. A su vez, el flujo másico del fluido a mayor temperatura, $\dot{m}_F$, corresponde al flujo másico de los gases de escapes de calderas ($\dot{m}_g$), y circulará por el lado de la coraza (flujo al exterior del banco de tubos).

El IC se compone de los elementos representados en la Figura 2 y se detallan junto con sus funciones en la Tabla 1.

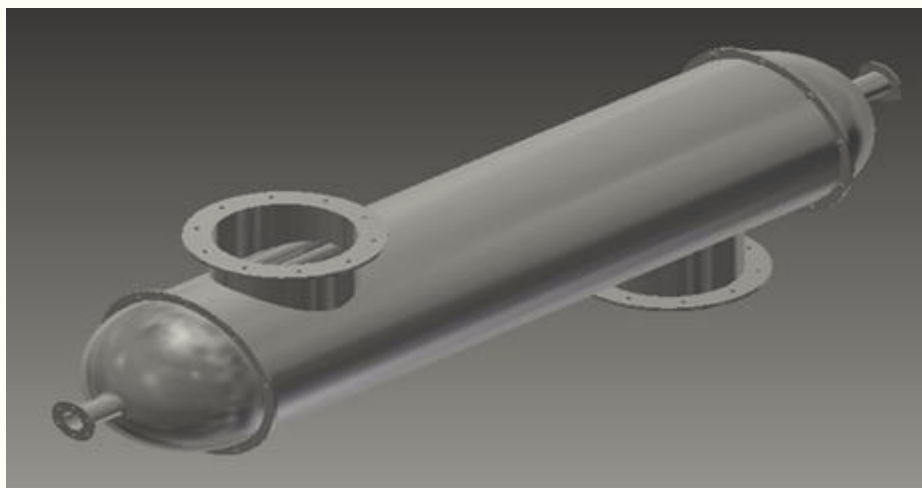


Figura 1. Diseño propuesto del intercambiador de calor.

Tabla 1. Elementos del intercambiador de calor.

Nº	Pieza	Descripción
1	Deflector principal	Separa el contacto entre el agua de alimentación y lo gases de escape, evitando que se mezclen.
2	Tubos	Conducto por el cual circula el agua de alimentación de la caldera en el IC.
3	Deflector	Segmentado que permite el paso múltiple de los gases de escape por el lado de la coraza.
4	Carcaza	Cuerpo del IC por el cual circula el gas de escape, cubriendo a su vez el banco de tubos.
5	Cabezal frontal	Elemento por el cual hace ingreso el agua de alimentación.
6	Cabezal posterior	Elemento de salida del agua de alimentación.

Para evitar los efectos dañinos de la corrosión producto del contacto con gases de escapes de calderas el diseño del IC contempla la construcción de la coraza, tubos y demás piezas con acero inoxidable AISI 316, el cual corresponde a un acero inoxidable aleado con molibdeno y de estructura austenita.

La resistencia a la corrosión se debe a la capacidad de esta aleación de formar una película adherente

(capa pasiva) y estable de Óxido de Cromo (Cr_2O_3), también llamada cromita, que es la encargada de proteger el acero en un ambiente oxidante^[12], ampliamente utilizado en la industria química, principalmente en equipos, piezas o elementos expuestos a la corrosión localizada.

Las principales propiedades utilizadas en este estudio se resumen en la Tabla 2.

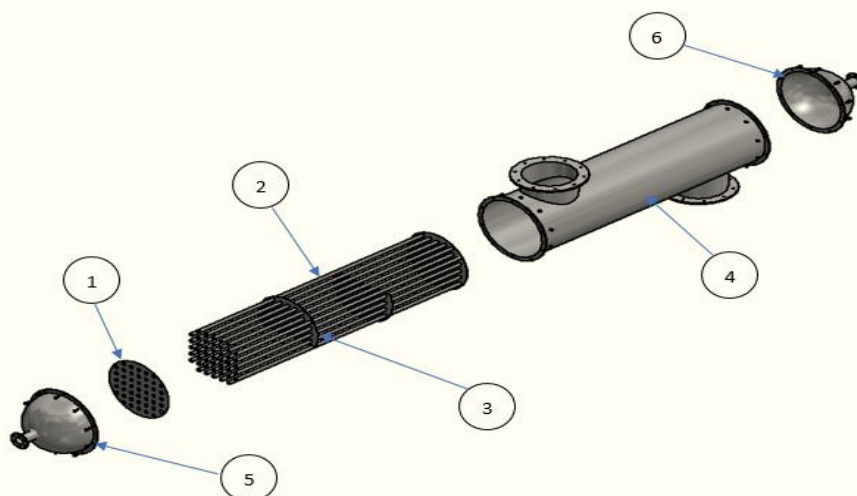


Figura 2. Diseño del IC de tubo y coraza (despiece).

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del acero AISI 316

Características técnicas del acero	Descripción
Densidad (ρ acero), g/cm ³	7,96-7,98
Conductividad térmica (k), kW/m.°C	0,015-0,016
Presión máxima admisible (P_{adm}), kg/cm ²	47,46
Esfuerzo de fluencia del acero ($\sigma_{fluencia}$), kg/cm ²	836,65
Estructura	Austenítico

Fuente: Adaptado de (Carbone Stainless Steel)

La vista isométrica del intercambiador de calor una vez instalado en el ducto de escape de gases de combustión hecha en Inventor Professional

Autodesk®, se presenta en Figura 3.

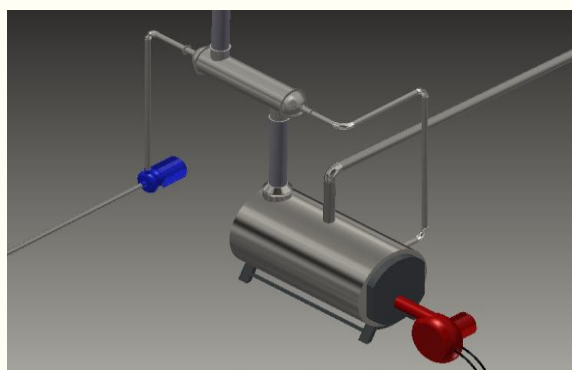


Figura 3. Vista isométrica del intercambiador instalado en el ducto de gases de escape de la caldera.

ANÁLISIS MULTISDISCIPLINARIO

El análisis sistémico de un intercambiador de calor identifica implícitamente tres disciplinas o subsistemas que interactúan entre sí: Transferencia de calor y Termodinámica o subsistema térmico, propiedades geométricas o subsistema estructural y Mecánica de Fluidos o subsistema hidráulico.

El Análisis Multidisciplinario permite conocer el comportamiento de los subsistemas antes de plantear el modelo de optimización, sus objetivos disciplinarios

individuales, sus respectivas restricciones acorde a leyes propias de la naturaleza y de factibilidad técnica; y como éstos en conjunto interactúan entre sí para cumplir con el objetivo principal para el cual será diseñado el sistema complejo de ingeniería. De acuerdo con la Matriz de Estructura de Diseño Ampliada del IC, el input del sistema complejo corresponde al vector de variables de diseño del sistema, ecuación (1).

$$\vec{X}=[x_0, x_1, x_2, x_3]^T \quad (1)$$

Donde:

x_0 : Variables de diseño del IC compartidas por más de un subsistema.

$x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_1$: Variables de diseño propias del subsistema térmico, estructural e hidráulico respectivamente.

Las variables de diseño compartidas por más de un subsistema se encuentran dadas por el vector x_0 , ecuación (2).

$$x_0=[D_{E.T}, D_{I.T}, \dot{m}_T, N_T, L_T, P_T, \dot{m}_C]^T \quad (2)$$

Donde:

$D_{E.T}, D_{I.T}$: Diámetro exterior e interior de los tubos respectivamente, m[m].

N_T : Número de tubos, adimensional.

L_T : Longitud de los tubos, m.

P_T, P_T : Distancia centro de los tubos, m.

Las interrelaciones entre los subsistemas se presentan mediante el vector de variables de estado o acoplamiento, $\vec{Y}$, ecuación (3), el cual se compone por las variables de acoplamiento, y_{ij} , perteneciente a la disciplina i que son necesarias para el planteamiento y desarrollo numérico de la disciplina j .

$$\vec{Y}=\begin{bmatrix} y_{12} \\ y_{21} \\ y_{23} \\ y_{31} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} A_{E.T} \\ D_{I.C} \\ A_{I.T} \\ Re_a \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde:

$A_{E.T}, A_{I.T}$: Área exterior e interior de transferencia de calor respectivamente, m².

$D_{I.C}$: Diámetro interior de la coraza, m.

Re_a : Número de Reynolds para el agua de alimentación, adimensional.

El *output* del sistema complejo corresponde al modelo de optimización no lineal y multidisciplinario del diseño del IC, sujeto a restricciones de igualdad y desigualdad.

ANÁLISIS DISCIPLINAR I: SUBSISTEMA TÉRMICO

El objetivo de este subsistema es obtener el área exterior de transferencia de calor óptima que permita Las variables de diseño propias del subsistema térmico se representan por el vector, x_1 , ecuación (4).

el flujo de calor entre los dos fluidos cumpliendo con la primera y segunda ley de la Termodinámica.

$$x_1 = [T_{2a}, T_{2g}, \dot{m}_{\text{comb}}]^T \quad (4)$$

Donde:

T_{2a} , T_{2g} : Temperatura final del agua de alimentación y de los gases de escape de combustión de caldera respectivamente, °C.

$\dot{m}_{\text{comb}}$: Flujo másico del combustible, kg/s.

A su vez, las variables de acoplamiento, Y_{21} e Y_{31} , corresponden al vector representado por la ecuación (5).

$$\begin{bmatrix} Y_{21} \\ Y_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{l.c} \\ Re_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

Por otra parte, el *output* del subsistema térmico corresponde a la variable de acoplamiento Y_{12} , ecuación (6), propia del subsistema I necesaria para el

planteamiento matemático de las ecuaciones gobernantes del subsistema II.

$$Y_{12} = A_{E.T} \quad (6)$$

Donde el área exterior de transferencia de calor, $A_{E.T}$, se obtiene a partir de la ecuación básica de diseño de

un IC, ecuación (7).

$$A_{E.T} = \frac{\dot{Q}_{\text{Int}}}{U_{E.T} \cdot F \cdot \Delta T_{ML}}, \text{ m}^2 \quad (7)$$

Donde: La potencia térmica del intercambiador de calor, $\dot{Q}_{\text{Int}}$, se define según la ecuación (8).

C_{pa} : Calor específico a presión constante del agua de alimentación (valor constante dependiente de la temperatura del agua).

$$\dot{Q}_{\text{int}} = \dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{2a} - T_{1a}), \text{ kW} \quad (8)$$

La diferencia media logarítmica de temperatura, ΔT_{ML} , se determina a partir del diseño de un IC de flujo cruzado, ecuación (9). Al existir múltiples pasos

del fluido que circula por el lado de la coraza, se multiplica por el factor de corrección F, valor constante definido previamente a partir de la literatura con un valor de 0.9^[2].

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\text{Log} \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Donde:

ΔT_1 y ΔT_2 : Representan las diferencias entre la temperatura de los gases de escape que circula por el

lado de la coraza y la temperatura del agua de alimentación que circula al interior de los tubos, ecuaciones (10) y (11).

$$\Delta T_1 = T_{1g} - T_{2a}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$\Delta T_2 = T_{2g} - T_{1a}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

El coeficiente de transferencia de calor térmica exterior, $U_{E.T}$, se calcula a partir de la resistencia

térmica total, R , del IC, ecuación (12).

$$R = \frac{1}{U_{E.T} \cdot A_{E.T}} = \frac{1}{U_{I.T} \cdot A_{I.T}}, \text{ } ^\circ\text{C} / \text{kW} \quad (12)$$

Donde las áreas de transferencia externa e interna se

determinan según las ecuaciones (13) y (14).

$$A_{ET} = \pi \cdot N_T \cdot D_{ET} \cdot L_T, \text{ } \text{m}^2 \quad (13)$$

$$A_{I.T} = \pi \cdot N_T \cdot D_{I.T} \cdot L_T, \text{ } \text{m}^2 \quad (14)$$

La resistencia térmica total del IC, R , para un banco de tubos de espesor distinto también se puede representar a partir de la suma de la resistencia térmica del agua,

R_{agua} , del tubo, R_{Tubo} , y de los gases de escape, R_{gas} [13], ecuación (15).

$$R = R_{\text{agua}} + R_{\text{Tubo}} + R_{\text{gas}}, \text{ } ^\circ\text{C} / \text{kW} \quad (15)$$

Trabajando con las ecuaciones (7), (12) y (15) se obtiene la ecuación (16) para determinar el área

exterior de transferencia térmica^[2].

$$A_{E.T} = \left[\frac{D_{E.T}}{D_{I.T}} \cdot \frac{1}{h_a} + \frac{D_{E.T}}{2k} \cdot \text{Ln} \left(\frac{D_{E.T}}{D_{I.T}} \right) + \frac{1}{h_g} \right] \left[\frac{\dot{Q}_{\text{Int}}}{F \cdot \Delta T_{ML}} \right], \text{ } \text{m}^2 \quad (16)$$

Donde:

h_a y h_g : Coeficientes de convección del agua de alimentación y de los gases de combustión respectivamente.

El coeficiente de convección, h_a , ecuación (17), se determina a partir del coeficiente de conducción del agua de alimentación, k_a , del diámetro interior del

tubo, $D_{I.T}$ y el Número de Nusselt del agua, N_{ua} , ecuación (18). Este último representa “el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa” [13] es adimensional y para efectos de este estudio se formula a partir de la ecuación Dittus-Boelter^[14], la

cual es dependiente del número de Reynolds y Prandtl, Pr ; números adimensionales que dependen de la

velocidad y la temperatura del fluido que circula al interior de los tubos, respectivamente.

$$h_a = 0.023 \cdot \frac{k_a}{D_{i,T}} \cdot Re_a^{0.8} \cdot Pr_a^{0.4}, \quad kW/(m^2 \cdot ^\circ C) \quad (17)$$

$$Nu_a = 0.023 \cdot Re_a^{0.8} \cdot Pr_a^{0.4} \quad (18)$$

De forma análoga se determina h_g , ecuación (19), el cual depende del diámetro equivalente hidráulico, D_{Eh} , del gas de escape al interior de la coraza, ecuación (20), Figura 5, el coeficiente de conductividad térmica de los gases de escape, k_g y del Número de Nusselt de los gases de escape, Nu_a , el cual se determina

$$h_g = 0.36 \cdot \frac{k_g}{D_{Eh}} \cdot Re_g^{0.55} \cdot Pr_g^{0.33}, \quad kW/(m^2 \cdot ^\circ C) \quad (19)$$

$$D_{Eh} = \frac{4 \cdot (P_T^2 - \pi \cdot D_{E,T}^2 / 4)}{\pi \cdot D_{E,T}}, \quad m \quad (20)$$

$$Nu_g = 0.36 \cdot Re_g^{0.55} \cdot Pr_g^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{Capa limite}}}{\mu_{\text{Pared Tubo}}} \right)^{0.14} \quad (21)$$

Fuente: Adaptado de *HEAT EXCHANGERS Selection, Rating and Thermal Design* [16]

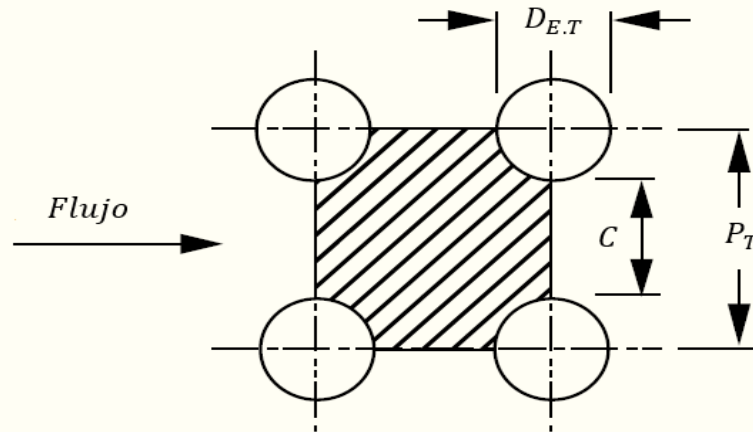


Figura 5. Disposición de tubos en 90°.

El número de Reynolds de los gases de escape, Re_g , se calcula según la ecuación (22) [16], la cual es dependiente del flujo másico de los gases de escape, $\dot{m}_g$, el diámetro equivalente hidráulico, D_{Eh} , el área hidráulica de los gases de escape, A_h , ecuación (23),

Figura 5, y la viscosidad dinámica de los gases de escape, μ_g , valor constante dependiente de la temperatura.

$$Re_g = \frac{\dot{m}_g}{A_h} \cdot \frac{D_{Eh}}{\mu_g} \quad (22)$$

$$A_h = \frac{D_{i.c} \cdot B \cdot C}{P_T}, \quad m^2 \quad (23)$$

Donde:

C: Distancia entre el perímetro exterior de los tubos y

se calcula según la ecuación (24).

$$C = P_T - D_{E.T}, \quad m \quad (24)$$

Con la finalidad de aumentar el flujo de calor entre ambos fluidos se usan dos deflectores (3 pasos) en el

lado de la coraza, Figura 6, siendo B la distancia entre los deflectores y se determina según la ecuación (25).

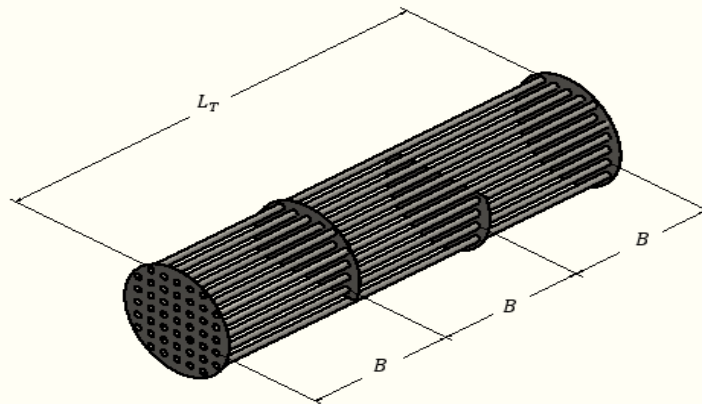


Figura 6. Distancia entre deflectores lado de la coraza (3 pasos).

$$B = \frac{L_T}{3}, \quad m \quad (25)$$

ANÁLISIS DISCIPLINARI II: SUBSISTEMA ESTRUCTURAL

El subsistema estructural es el encargado de estudiar las propiedades geométricas del sistema complejo, con el objetivo de minimizar la masa total del IC, M_{Total} . Los *inputs* del subsistema estructural corresponden a las variables compartidas por más de un subsistema, x_0 , ecuación (2), la variable de acoplamiento, y_{12} ,

ecuación (6), perteneciente al subsistema térmico y las variables de diseño propias del subsistema estructural, x_2 , ecuación (26).

El *output* del subsistema estructural corresponde al vector de variable de acoplamiento, ecuación (27).

$$x_2 = D_{E.C} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} y_{21} \\ y_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{i.C} \\ A_{i.T} \end{bmatrix} \quad (27)$$

El diámetro interno de la coraza, $D_{i.C}$, se determina por la ecuación (28), la cual es una función del área exterior de transferencia de calor, ecuación (16), la

longitud de los tubos, L_T , y la razón, PR , entre la distancia de los centros geométricos de los tubos, P_T , y el diámetro de los tubos, $D_{E.T}$ ^[2].

$$D_{i.C} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \left[\frac{A_{E.T} \cdot (PR)^2 \cdot D_{E.T}}{L_T} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad m \quad (28)$$

Donde: $PR = P_T/D_{E.T}$

La constante de ordenamiento de tubos, CL ($CL = 1$) y la constante de recuento de tubos CTP ($CTP = 0.93$), son valores que dan cuenta la cobertura incompleta del

diámetro interior de la coraza. Los valores fueron definidos para una disposición de 90° y un solo paso del fluido dentro de los tubos^[2].

La masa total del IC, se determina según la ecuación (29).

$$M_{Total} = \rho_{Acero} \cdot (V_{Tubos} + V_{Coraza}), \quad kg \quad (29)$$

Donde el volumen de los tubos, V_{Tubos} , se calcula

según la ecuación (30).

$$V_{Tubos} = \frac{1}{4} (D_{E.T} \cdot A_{E.T} - D_{i.T} \cdot A_{i.T}), \quad m^3 \quad (30)$$

El volumen de la coraza, V_{coraza} , corresponde a la suma del volumen de la carcasa, $V_{carcasa}$, cabezal frontal, $V_{Cab. Frontal}$ y cabezal posterior, $V_{Cab. Posterior}$. Para efecto de simplificar el modelo matemático, tanto el volumen del cabezal frontal, ecuación (31),

como el volumen del cabezal posterior, (32), se definen como una media esfera a partir del diámetro exterior, ecuación (26), e interior de la coraza, ecuación (28), Figura 7.

$$V_{\text{Cab. Frontal}} = \frac{\pi}{12} \cdot (D_{\text{E.C}}^3 - D_{\text{I.C}}^3), \quad \text{m}^3 \quad (31)$$

$$V_{\text{Cab. Posterior}} = \frac{\pi}{12} \cdot (D_{\text{E.C}}^3 - D_{\text{I.C}}^3), \quad \text{m}^3 \quad (32)$$

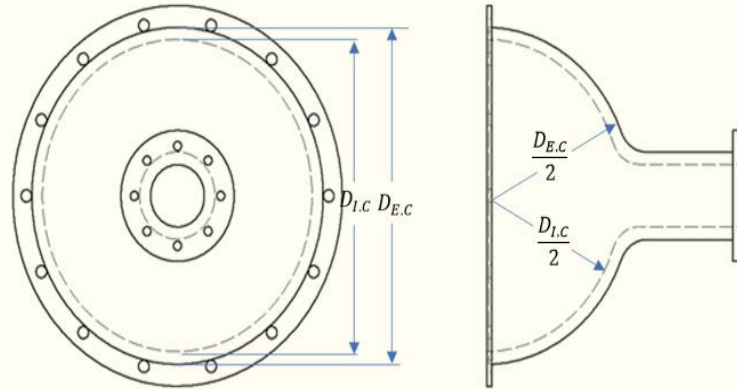


Figura 7. Cabezal frontal (y posterior) del intercambiador de calor.

El volumen del cuerpo cilíndrico de la coraza se calcula según la ecuación (33). En la Figura 8 se representa una vista isométrica de la coraza del IC.

$$V_{\text{Cuerpo.}} = \frac{\pi}{4} \cdot L_T \cdot (D_{\text{E.C}}^2 - D_{\text{I.C}}^2), \quad \text{m}^3 \quad (33)$$

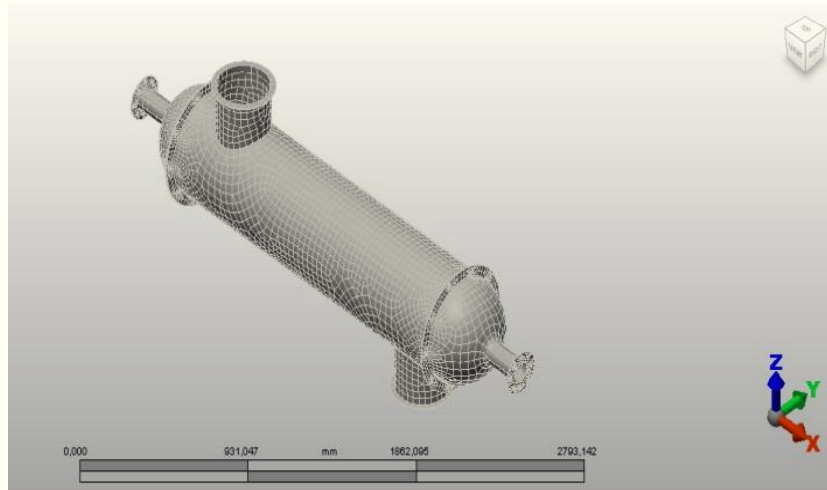


Figura 8. Vista isométrica 3D del IC.

ANÁLISIS DISCIPLINAR III: SUBSISTEMA HIDRÁULICO

El análisis hidráulico tiene como objetivo la optimización de la potencia de bombeo del agua de alimentación, $P_{Bomb.}$, con el fin de no exceder el costo actual de consumo de energía eléctrica en el sistema. Los *inputs* del subsistema hidráulico están dados por las variables de diseño compartidas por más de un subsistema, x_0 , ecuación (2), las variables de diseño

propias del subsistema hidráulico, x_3 , ecuación (27), y la variable de acoplamiento, y_{23} , ecuación (27).

Las variables de diseño propias del subsistema hidráulico corresponden a la presión del agua de alimentación a la salida de la bomba, P_2 [Pa], ecuación (34).

$$x_3 = P_2 \quad (34)$$

La potencia de impulsión de la bomba, $P_{Bomb.}$, se determina según la ecuación (35).

$$P_{Bomb.} = \frac{\dot{m}_a \cdot g \cdot H_{Bomb.}}{1000}, \text{ kW} \quad (35)$$

Donde:

$H_{Bomb.}$: Altura dinámica total de la bomba, m.

g : Aceleración de la gravedad, m^2/s .

La altura dinámica total de la bomba se basa en un balance de energía mecánica, donde se tiene en cuenta las pérdidas por fricción tanto en las tuberías como las

provocadas en los diferentes accesorios. Las pérdidas por fricción en los conductos estarán en función del factor de fricción o Fanny, f .

El coeficiente de fricción, f , [15] es una función empírica calculada a partir del número de Reynolds, $Re_{Cond.}$, ecuación (36).

$$f = [1,82 \cdot \log_{10}(Re_{Cond.}) - 1,64]^2 \quad (36)$$

MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN FUNCIÓN OBJETIVO

Basado en el análisis multidisciplinario de los tres subsistemas definidos anteriormente, el modelo de optimización, ecuación (37), busca minimizar la función objetivo definida como el costo total de diseño del IC, $C_{Tot.}(\bar{X}, \bar{Y})$, dependiente del vector de variables

de diseño $\bar{X}$, ecuación (1), y el vector de variables de acoplamiento o estado, $\bar{Y}$, ecuación (3). De forma clara se busca minimizar el costo total del intercambiador de calor definido por la suma de la inversión inicial y el costo de operación anual.

$$\text{Min } C_{Tot.}(\bar{X}, \bar{Y}) = I_0 + C_{Oper.}, \quad \$ \quad (37)$$

Donde:

I_0 : Inversión inicial correspondiente al costo de la estructura de acero del IC, ecuación (38) (Se omitió el

costo de mano de obra y costos indirectos de fabricación con la finalidad de simplificar el modelo matemático de optimización).

$$I_0 = C_{Acero} \cdot M_{Total}, \quad \$ \quad (38)$$

Donde: C_{Acero} es el Costo del acero, \$/kg.

COSTO OPERACIONAL ANUAL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

El costo de operación anual, $C_{Oper.}$, ecuación (39), eléctrica $C_{Oper.Elect.}$, ecuación (40), y de consumo de combustible, $C_{Oper.Comb.}$, ecuación (41).

$$C_{Oper.} = C_{Oper.Elect.} + C_{Oper.Comb.}, \quad \$ \quad (39)$$

$$C_{Oper.Elect.} = \frac{1}{\eta_{Bomb}} \cdot C_{Elect.} \cdot P_{Bomb} \cdot H_{Oper.}, \quad \$ \quad (40)$$

$$C_{Oper.Comb.} = 3600 \cdot C_{Comb.} \cdot \dot{m}_{comb.} \cdot H_{Oper.}, \quad \$ \quad (41)$$

Donde:

$C_{Elect.}$: Es el costo por Kilowatt-Hora de Electricidad, \$/kW.h.

$H_{Oper.}$: Horas de operación anual, h.

η_{Bomb} : Eficiencia de la bomba, adimensional.

La ecuación (42) representa la definición de la función objetivo.

$$\text{Min } C_{Tot.}(X,Y) = I_0 + C_{Oper.Elect.} + C_{Oper.Comb.}, \quad \$ \quad (42)$$

RESTRICCIONES RESTRICCIONES DEL SUBSISTEMA TÉRMICO

El análisis térmico se basa en el cumplimiento de los Principios de la Termodinámica.

RESTRICCIONES DE DESIGUALDAD: CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

El máximo flujo de calor disponible en los gases de escapes de calderas, $\dot{Q}_{M\acute{a}x}$, corresponde al flujo de calor que se pierde por la chimenea.

- De acuerdo con Mutual de Seguridad Cámara Chilena de la Construcción^[17], $\dot{Q}_{M\acute{a}x}$, corresponden aproximadamente al 14% de $\dot{Q}_{Comb.}$.

Donde:

$\dot{Q}_{Comb.}$: Corresponde al producto del flujo másico del combustible, $\dot{m}_{comb.}$, por el poder calorífico inferior, PCI, valor constante dependiente del tipo de combustible utilizado en la caldera, ecuación (43).

$$\dot{Q}_{Comb.} = \dot{m}_{comb.} \cdot PCI, \quad kW \quad (43)$$

Obteniendo las restricciones siguientes, ecuaciones (44) y (45)

$$G_{1.1}(\bar{X}, \bar{Y}) = \dot{Q}_{\text{Int.}} \leq \dot{Q}_{\text{Máx}}, \quad \text{kW} \quad (44)$$

$$G_{1.2}(\bar{X}, \bar{Y}) = \dot{Q}_{\text{máx.}} \leq 0.14 \cdot \dot{Q}_{\text{Comb.}}, \quad \text{kW} \quad (45)$$

El flujo de calor aportado al agua de alimentación por el intercambiador, $\dot{Q}_{\text{Int.}}$, sumado al flujo de calor aportado por la combustión del combustible, $\dot{Q}_{\text{Comb.}}$,

(una vez instalado el IC) debe ser menor al flujo de calor que aportaba el combustible sin intercambiador, $\dot{Q}_{\text{Act. Comb.}}^*$, ecuación (46).

$$G_{1.3}(\bar{X}, \bar{Y}) = \dot{Q}_{\text{Comb.}} + \dot{Q}_{\text{Int.}} \leq \dot{Q}_{\text{Act. Comb.}}^*, \quad \text{kW} \quad (46)$$

La tasa de generación total de entropía, $\dot{S}_T$, en el IC debe ser mayor o igual a cero^[18], ecuación (47).

$$G_{1.4}(\bar{X}, \bar{Y}) = \dot{S}_T \geq 0, \quad \text{kW} / ^\circ\text{C} \quad (47)$$

○ De acuerdo a la Ley de Conservación de la Energía en un sistema, el balance de energía en el IC indica que el flujo de calor que cede el gas de escape, $\dot{Q}_g$, y el

flujo de calor que recibe el agua de alimentación, $\dot{Q}_a$, deben ser equivalentes, ecuación (48).

$$H_{1.1}(\bar{X}, \bar{Y}) = \dot{Q}_a - \dot{Q}_g = 0, \quad \text{kW} \quad (48)$$

○ El espesor mínimo en los tubos del IC se determina a partir de la presión máxima admisible, P_{adm} , y el esfuerzo de fluencia del acero, $\sigma_{\text{fluencia.}}$, ecuación (49).

$$G_{2.1}(\bar{X}, \bar{Y}) = \frac{D_{\text{E.T}} - D_{\text{I.T}}}{2} \geq \frac{P_{\text{adm}} \cdot D_{\text{E.T}}}{2 \cdot (\sigma_{\text{fluencia.}} + f \cdot P_{\text{adm}})}, \quad \text{m} \quad (49)$$

Además,

$$G_{2.2}(\bar{X}, \bar{Y}) = \frac{D_{\text{E.C}} - D_{\text{I.C}}}{2} \geq \frac{P_{\text{adm}} \cdot D_{\text{E.C}}}{2 \cdot (\sigma_{\text{fluencia.}} + f \cdot P_{\text{adm}})}, \quad \text{m} \quad (50)$$

○ La longitud máxima del IC se encuentra limitada por el espacio físico entre la caldera y la pared de la sala de caldera, ecuación (51).

$$G_{2.3}(\bar{X}, \bar{Y}) : D_{\text{E.C}} + L_T \leq \text{Espacio disponible}, \quad \text{m} \quad (51)$$

○ La altura dinámica de la bomba no puede sobrepasar la altura dinámica actual de la bomba, con

la finalidad de no consumir mayor energía eléctrica, ecuación (52).

$$G_{3.1}(\bar{X}, \bar{Y}) = H_{\text{Bomb}} \leq \text{Altura dinámica actual, m} \quad (52)$$

○ La presión del agua a la salida de la bomba debe ser mayor, al menos en un 10 %, a la presión mínima de trabajo de la caldera, ecuación (53).

$$G_{3.2}(\bar{X}, \bar{Y}) = P_2 \leq 1.1 \cdot P_{\text{trabajo caldera}}, \text{ Pa} \quad (53)$$

CASO DE ESTUDIO CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLANTA TIPO

El Modelo obtenido fue implementado en una empresa productora, comercializadora y exportadora líder a nivel mundial de mejillón en Chile. Su producción anual es de 25.000 toneladas métricas de mejillones.

Actualmente la planta cuenta con tres calderas igneotubulares trabajando a un rango de presión admisible de 8 a 10,34 bar. El agua de alimentación recibe un tratamiento previo para eliminar el exceso de oxígeno y realizar un precalentamiento del agua hasta una temperatura de 65 °C antes que ingrese a las calderas. Este tratamiento consiste en:

- 1) Ablandadores de agua para eliminar el exceso de calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- 2) Químicos, principalmente secuestrantes de oxígeno y anticorrosivos para evitar corrosiones en las calderas.

3) Tanque desgasificador para eliminar el exceso de dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂), evitando así la oxidación en las tuberías.

La demanda de vapor de cada caldera (el cual sale a una temperatura de 170 °C) corresponde aproximadamente en promedio a 3.249 kg_{vapor}/h y se utiliza en el cocedor de carne de mejillón continuo.

El modelo matemático de optimización se aplica de acuerdo a los datos técnicos y operacionales correspondientes a una de las calderas de vapor modelo S225HP.

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS

Para el trabajo con el Modelo matemático las propiedades fisicoquímicas se obtuvieron mediante tablas termodinámicas considerando la temperatura inicial del agua de alimentación y de los gases de escapes a la entrada del IC.

Las propiedades fisicoquímicas de los gases de escape, que pasarían por el lado de la coraza fueron determinadas por la temperatura medida en la

Las propiedades fisicoquímicas del agua de alimentación se calcularon a la temperatura de referencia de 13,5 °C, valor promedio aproximado entre la temperatura ambiental máxima (16 °C) y mínima (11 °C) del agua en la Región de Los Lagos^[13]. industria, 240 °C. Por otro lado, la temperatura ambiental de la sala de caldera se estimó en 30 °C.

ESTANDARIZACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

Para la función objetivo, ecuación No.42 de la Tabla 1, se consideraron constantes los siguientes parámetros operacionales y económicos:

Costo unitario:

- 1) El costo del acero por unidad de kilogramo, C_{Acero} , corresponde a 1.104 \$/kg ^[16].
- 2) El costo por Kilowatt-Hora de Electricidad, $C_{Elect.}$, corresponde a 86,6 \$/kW.h ^[17].
- 3) El costo por unidad de kilogramo de combustible, $C_{Comb.}$, corresponde a 260 \$/kg

Parámetros operacionales:

- 1) Se contemplan 4 560 horas de operación anual,

$H_{Oper.}$, Considerando que se trabajan 19 horas diarias por 20 días y 12 meses.

- 2) La eficiencia de la bomba, η_{Bomb} , se estima en un 80% ^[12].

Considerado los parámetros previamente especificados para la industria tipo, la función objetivo a minimizar correspondiente al costo total de diseño, $C_{Tot.}(\vec{X}, \vec{Y})$, presentada en el modelo matemático, ecuación (42), se reestructura mediante ecuación No. 54.

$$MinC_{Tot.}(\vec{X}, \vec{Y}) = 1.014 \cdot M_{Total} + 491.275 \cdot P_{Bomba} + 4.277.520.000 \cdot \dot{m}_{com.}, \quad \$ \quad (54)$$

RESTRICCIONES

Las restricciones se analizan en los tres subsistemas presentes: subsistema térmico, estructural y hidráulico, donde se detallan y explican todas las

consideraciones necesarias para realizar la estandarización del modelo propuesto.

SUBSISTEMA TÉRMICO

Para dar cumplimiento a las leyes naturales basadas en la conservación de la energía e Incremento de la entropía en un sistema, además de la factibilidad técnica propia de la operación de la planta, se consideraron ciertas restricciones a considerar en el modelo.

En cuanto al subsistema térmico se reemplazaron las propiedades fisicoquímicas del agua de alimentación, y de los gases de escape en las restricciones $G_{1,1}(\vec{X}, \vec{Y})$ y $G_{1,2}(\vec{X}, \vec{Y})$ obteniéndose las ecuaciones (55) y (56).

$$G_{1,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{m}_a \cdot 4,182 \cdot (T_{2a} - 13,5) - 219,66 \cdot \dot{m}_g \leq 0, \quad kW \quad (55)$$

$$G_{1,2}(\vec{X}, \vec{Y}) = 219,66 \cdot \dot{m}_g - 6010 \cdot \dot{m}_{Comb.} \leq 0, \quad kW \quad (56)$$

Por otra parte, el flujo de calor actual aportado a la caldera por el combustible sin considerar el intercambiador de calor, $\dot{Q}_{Act.Comb.}$ que permite el

cambio de fase del agua se obtiene a partir de la ecuación (57).

$$\dot{Q}_{Act.Comb.} = \dot{m}_{Act.Comb.} \cdot PCI = \left(\frac{1}{3600} \right) \cdot (226) \cdot (42.926,5) = 2.694,8, \quad kW \quad (57)$$

Donde $\dot{m}_{Act.Comb.}$ corresponde al flujo másico actual de combustible y PCI al Poder calorífico Inferior de éste. Por la Ley de Conservación de la Energía el flujo de

calor aportado al agua de alimentación por el intercambiador de calor y el combustible no debe exceder los 2 694,8 kW que en la actualidad aporta

el combustible sin la presencia de Intercambiador de calor, ecuación (58).

$$G_{1,3}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{Q}_{Comb.} + \dot{Q}_{Int.} \leq 2694,8, \quad kW \quad (58)$$

A su vez, y por el mismo principio, el flujo de calor que es aportado al agua y el flujo de calor que ceden los gases de escape deben ser equivalentes y reemplazando los valores de las propiedades

físicoquímicas de ambos fluidos, la restricción $H_{1,1}(\vec{X}, \vec{Y})$, queda según la ecuación (58).

$$H_{1,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{m}_a \cdot 4,182 \cdot (T_{2a} - 13,5) - \dot{m}_g \cdot 1,046 \cdot (240 - T_{2g}) = 0, \quad kW \quad (58)$$

El Principio de Incremento de Entropía en un sistema indica que la tasa de generación de entropía total, $\dot{S}_T$, correspondiente a la suma de tasa de generación de entropía causada por la diferencia finita de

temperatura, $\dot{S}_{\Delta T}$, y la tasa de generación de entropía causada por la fricción del fluido, $\dot{S}_{\Delta P}$, debe ser mayor o igual a cero, ecuación (59).

$$G_{1,4}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{S}_{\Delta T} + \dot{S}_{\Delta P} \geq 0, \quad kW / ^\circ C \quad (59)$$

SUBSISTEMA ESTRUCTURAL

Reemplazando los valores correspondientes a la presión máxima admisible P_{adm} (47,46 kg/cm²) y el esfuerzo de fluencia $\sigma_{fluencia}$ (836,65 kg/cm²) del acero AISI 316, se obtiene que la restricción correspondiente al espesor mínimo de los tubos

$G_{2,1}(\vec{X}, \vec{Y})$, y espesor mínimo de la coraza $G_{2,2}(\vec{X}, \vec{Y})$, se estandarizada mediante las ecuaciones (60) y (61).

$$G_{2,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = 0,055 \cdot D_{E.C} - (D_{E.T} - D_{I.T}) \leq 0, \quad m \quad (60)$$

$$G_{2,2}(\vec{X}, \vec{Y}) = 0,055 \cdot D_{E.C} - (D_{E.C} - D_{I.C}) \leq 0, \quad m \quad (61)$$

La longitud disponible en la sala de caldera, Figura (2), corresponde aproximadamente a 3 m desde la

chimenea de la caldera hasta la pared posterior de la sala, quedando restringida según la ecuación (62).

$$G_{2,3}(\vec{X}, \vec{Y}) = D_{E.C} + L_T \leq 3, \quad m \quad (62)$$

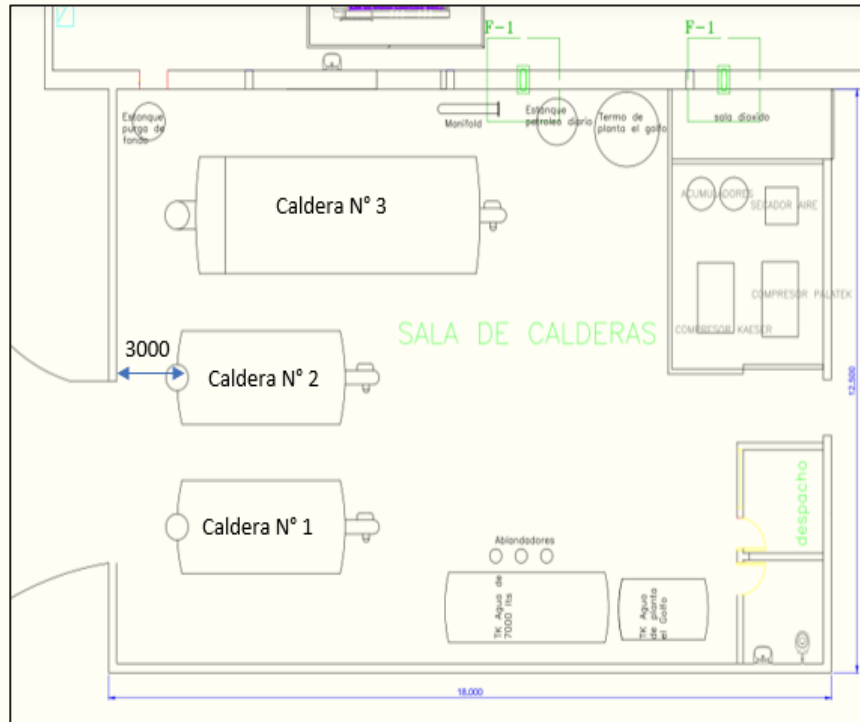


Figura 2. Distribución de la sala de caldera (unidad de medida mm)

SUBSISTEMA HIDRÁULICO

Las restricciones del subsistema hidráulico indican que la altura dinámica de la bomba que impulsa el agua de alimentación al intercambiador de calor, H_{bomb} no

debe superar a la altura dinámica de la bomba instalada actualmente en la sala de caldera, ecuación (63).

$$G_{3,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = H_{bomb} \leq 132, \quad m \quad (63)$$

La presión del fluido a la salida de la bomba, P_2 , debe ser superior un 10 % a la presión mínima de trabajo de la caldera (8 bar) con la finalidad de superar la caída

de presión al interior de los tubos del intercambiador de calor, ecuación (64).

$$G_{3,2}(\vec{X}, \vec{Y}) = P_2 - 880.000 \leq 0, \quad m \quad (64)$$

Obteniéndose el Modelo de Optimización del Diseño Multidisciplinario del intercambiador de calor

estandarizado y aplicado a la industria tipo, el cual se resume en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelo de Optimización del Diseño multidisciplinario estandarizado

Ecuaciones	Nº
$Min C_{Tot.}(\vec{X}, \vec{Y}) = 1014 \cdot M_{Total} + 491275 \cdot P_{Bomba} + 4277520000 \cdot \dot{m}_{com.}$	(12)
S.A	
$G_{1,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{m}_a \cdot 4,182 \cdot (T_{2a} - 13,5) - 219,66 \cdot \dot{m}_g \leq 0$	(13)
$G_{1,2}(\vec{X}, \vec{Y}) = 219,66 \cdot \dot{m}_g - 6010 \cdot \dot{m}_{Comb.} \leq 0$	(14)
$G_{1,3}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{Q}_{Comb.} + \dot{Q}_{int.} \leq 2694,8$	(16)
$G_{1,4}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{S}_{\Delta T} + \dot{S}_{\Delta P} \geq 0$	(18)
$G_{2,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = 0,055 \cdot D_{E.C} - (D_{E.T} - D_{I.T}) \leq 0$	(19)
$G_{2,2}(\vec{X}, \vec{Y}) = 0,055 \cdot D_{E.C} - (D_{E.C} - D_{I.C}) \leq 0$	(20)
$G_{2,3}(\vec{X}, \vec{Y}) = D_{E.C} + L_T - 3 \leq 0$	(21)
$G_{3,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = H_{bomb} - 132 \leq 0$	(22)
$G_{3,2}(\vec{X}, \vec{Y}) = P_2 - 880000 \leq 0$	(23)
$H_{1,1}(\vec{X}, \vec{Y}) = \dot{m}_a \cdot 4,182 \cdot (T_{2a} - 13,5) - \dot{m}_g \cdot 1,046 \cdot (240 - T_{2g}) = 0$	(17)
$LI \leq X \leq LS$	

RESULTADOS

El valor obtenido en la función objetivo intercambiador de calor equivale a \$248.946.094. Este correspondiente al costo total de diseño del valor se desglosa según se resume en la Tabla 4.

Tabla 4. Desglose de la función objetivo

Costos de diseño y operación	Valor [\$]
Inversión inicial, I_0	998.569
Costo operacional anual consumo de combustible, $C_{Oper.Comb}$	247.553.280
Costo operacional anual consumo de energía eléctrica de la bomba, $C_{Oper.Elect}$	394.245
Total (Función objetivo)	248.946.094

El costo operacional mensual correspondiente al consumo de combustible y energía eléctrica se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Costo de operación mensual

Costo mensual	Valor [\$]
Consumo de combustible	20.629.440
Consumo de energía eléctrica	32.854
Costo mensual total	20.662.294

La masa total del intercambiador de calor corresponde a 904,50 kg. En la Tabla 6, se resumen los valores correspondientes a la masa de los tubos y de la coraza.

Tabla 6. Masa de los tubos y de la coraza del intercambiador de calor

Ítem	Valor, kg
Masa de los tubos, M_{Tubos}	217,12
Masa de la coraza, M_{Coraza}	687,38
Masa total, M_{Total}	904,50

Los resultados obtenidos respecto a las variables de diseño se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados variables de diseño

Variables de diseño	Límites [LI ; LS]	Resultado
Diámetro exterior de los tubos (D_{ET}), m	[0,0422;0,114]	0,08
Diámetro interior de los tubos (D_{IT}), m	[0,0422;0,1030]	0,0756
Flujo másico agua de alimentación al interior de los tubos ($\dot{m}_a$), kg / s	[0,90; 0,99]	0,90
Temperatura agua de alimentación a la salida de los tubos, (T_{2a}), °C	[65; 100]	65
Temperatura gases de escape a la salida del IC, (T_{2g}), °C	[120; 240]	122,8
Número de tubos, (N_T).	[20; 100]	25
Longitud de los tubos, (L_T), m	[2; 4]	2
Flujo másico gases de escapes, ($\dot{m}_g$), [kg / s]	[0,5; 2,5]	1,59
Distancia entre los centro de los tubos, (p_t), m	[0,5; 0,1]	0,1
Flujo másico del combustible, ($\dot{m}_{comb}$), kg / s	[0,058; 0,063]	0,058
Diámetro exterior de la coraza, ($D_{E.C}$), m	[0,6; 3]	0,62
Presión de salida del agua al interior de los tubos, (P_a), Pa	[800 000;1 034 000]	880.000

El valor correspondiente a la potencia hidráulica de la bomba necesaria para impulsar el agua de alimentación por el intercambiador de calor hasta la caldera se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones técnicas de la bomba

Ítem	Valor
Flujo másico agua de alimentación al interior de los tubos, ($\dot{m}_a$), kg / s	0,90
Altura dinámica de la bomba, (H), m	90,16
Potencia de la bomba, ($P_{\text{Bomb.}}$), kW	0,799

En la Tabla 9 se presenta la comparación correspondiente a la operación actual sin intercambiador de calor versus la operación una vez instalado el intercambiador.

Tabla 9. Análisis comparativo de la operación de la planta

Ítem	Sin intercambiador	Con intercambiador
Consumo de combustible mensual, \$	22.328.800	20.629.440
Consumo de energía eléctrica mensual, \$	48.127	32.854
Potencia de la bomba, ($P_{\text{Bomb.}}$), kW	1,17	0,799
Flujo másico gases de escapes, ($\dot{m}_g$), kg / s	1,71	1,59

CONCLUSIONES

El trabajo muestra que es factible abordar el diseño de calderas utilizando la herramienta MDO, Optimización Multidisciplinaria de Diseños, considerando como subsistemas el térmico, estructural e hidráulico. Para el sistema se considera la arquitectura monolítica Simultánea y Diseño de Análisis, SAD. Como resultado se obtiene una ecuación no lineal sujeta a restricciones del mismo tipo factible de solucionar con el algoritmo propuesto.

La relevancia del estudio radica en que optimizando la función objetivo sujeta a las restricciones definidas en el trabajo se tiene la ventaja de obtener los valores mínimos óptimos para las variables de diseño y estado de los sistemas térmico, estructural e hidráulico.

Se puede concluir que la limitación es que no se logra una completa interacción entre las tres disciplinas estudiadas puesto que de 6 posibles interrelaciones matemáticas (variables compartidas o de acoplamiento entre subsistemas Y_{ij}) sólo se lograron determinar 4.

Se puede aplicar estos resultados para el diseño de calderas de plantas de procesamiento de mitilidos de Chiloé, Chile, logrando un uso efectivo de la energía térmica residual presente en los gases de escape generados por el funcionamiento de estas. Esto permitiría: disminuir el costo de operación mensual correspondiente al consumo de combustible, reducir la emisión de gases contaminantes hacia la atmosfera, la

reducción del costo de energía eléctrica necesaria para el trabajo de impulsión de la bomba y, finalmente, la inversión inicial correspondiente al costo estructural del intercambiador de calor se recuperaría en menos tiempo. Estas estimaciones no contemplan el costo de mano de obra ni los costos indirectos de fabricación del intercambiador de calor.

El caso de estudio muestra que la implementación de un intercambiador de calor diseñado mediante el Modelo de Optimización Multidisciplinario, Tabla 3, es capaz de hacer uso efectivo de la energía térmica residual presente en los gases de escape de calderas:

(1) una disminución del 7,6 % en el costo de operación mensual correspondiente al consumo de combustible, lo que significaría un ahorro mensual de \$1.699.360.
(2) Al reducir el consumo de combustible, la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera se reduciría en un 7,0 %.

(3) La reducción del costo de operación mensual en energía eléctrica debido al trabajo de impulsión de la bomba en un 31,0 %, ahorrando de \$15.273 mensual.

(4) La inversión inicial, \$998.569, correspondiente al costo estructural del intercambiador de calor se recuperaría en el primer mes. Esta estimación no contempla el costo de mano de obra ni los costos indirectos de fabricación del intercambiador de calor.

REFERENCIAS

- [1] L. Prieto-parra, Yohannessen, K., Brea, C., Vidal, D., Ubilla, C. A., & Ruiz-rudolph, P., "Air pollution, PM2.5 composition, source factors, and respiratory symptoms in asthmatic and nonasthmatic children in Santiago, Chile," *Environment International*, vol. 101, pp. 190-200, 2017/04/01/ 2017.
- [2] S. Kakaç, Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. , *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, Third Edition ed. Boca Raton London New York, 2012.
- [3] G. Brienza, & Lackenbach., *Exchanger design handbook*,: HPC. USA, 1983.
- [4] J. R. R. A. Martins, & Lambe, A. B., "Multidisciplinary Design Optimization: A Survey of Architectures," *AIAA Journal*, vol. 51, pp. 2049-2075, 2013.
- [5] T. M, "Complejidad y sistemas complejos," *História Ciências Saúde-Manguinhos* vol. 2, pp. 46 - 66, June 1995 1995.
- [6] H. Huang, An, H., Wu, B., & Zhang, L., "A non-nested collaborative optimization method for multidisciplinary design optimization and its application in satellite designs," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 230, pp. 2292–2305, 2016.
- [7] W. Sun, Wang, X., Wang, L., Zhang, J., & Song, X. , "Multidisciplinary design optimization of tunnel boring machine considering both structure and control parameters under complex geological conditions," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 54, pp. 1073–1092, 2016.
- [8] T. Ashuri, Zaaier, M. B., Martins, J. R. R. A., & Zhang, J. , "Multidisciplinary design optimization of large wind turbines—Technical, economic, and design challenges," *Energy Conversion and Management*, vol. 123, pp. 56-70, 2016/09/01/ 2016.
- [9] B. Zhang, E, J., Gong, J., Yuan, W., Zuo, W., Li, Y., & Fu, J, "Multidisciplinary design optimization of the diesel particulate filter in the composite regeneration process," *Applied Energy*, vol. 181, pp. 14-28, 2016/11/01/ 2016.
- [10] A. Tovar, Arzola de la Peña, N., & Gómez, A., "Multidisciplinary design optimisation techniques.," *Ingeniería E Investigación*, vol. 27, pp. 84–92, 2007.
- [11] A. B. Lambe, & Martins, J. R. R. A., "Extensions to the design structure matrix for the description of multidisciplinary design, analysis, and optimization processes," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 46, pp. 273–284, 2012.
- [12] S. A. Leal Alanis, "CARACTERIZACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES Y ESTUDIO DE SU RESISTENCIA MECÁNICA Y CONFORMABILIDAD," *Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales*, San Nicolás de Las Garzas: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2011.
- [13] Y. Çengel, & Ghajar, A., *Heat and Mass Transfer*, 2011.
- [14] A. Şencan Şahin, B. Kılıç, and U. Kılıç, "Design and economic optimization of shell and tube heat exchangers using Artificial Bee Colony (ABC) algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 3356-3362, 2011/10/01/ 2011.
- [15] R. V. Rao and A. Saroj, "Constrained economic optimization of shell-and-tube heat exchangers using elitist-Jaya algorithm," *Energy*, vol. 128, pp. 785-800, 2017/06/01/ 2017.
- [16] S. Kakaç, H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, *HEAT EXCHANGERS Selection, Rating and Thermal Design*. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [17] M. d. S. C. C. d. I. Construcción., "Curso Capacitación Ocupacional: Operadores de calderas.," 2008.
- [18] Y. Çengel, & Boles, M., *Thermodynamics. An Engineering Approach. : New york: McGraw Hill*, 2011.
- [19] M. Pereira, E. Rego and M. Nagano., A, "Multiobjective Optimization Model for the Design of Hybrid Renewable Energy Systems". *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, N° 16, 2018

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

AGUAS ANDINAS S.A.

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

GUZMÁN Y LARRAÍN VIVIENDAS ECONÓMICAS SpA

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

ACTIC CONSULTORES LTDA.

ARCADIS CHILE S.A.

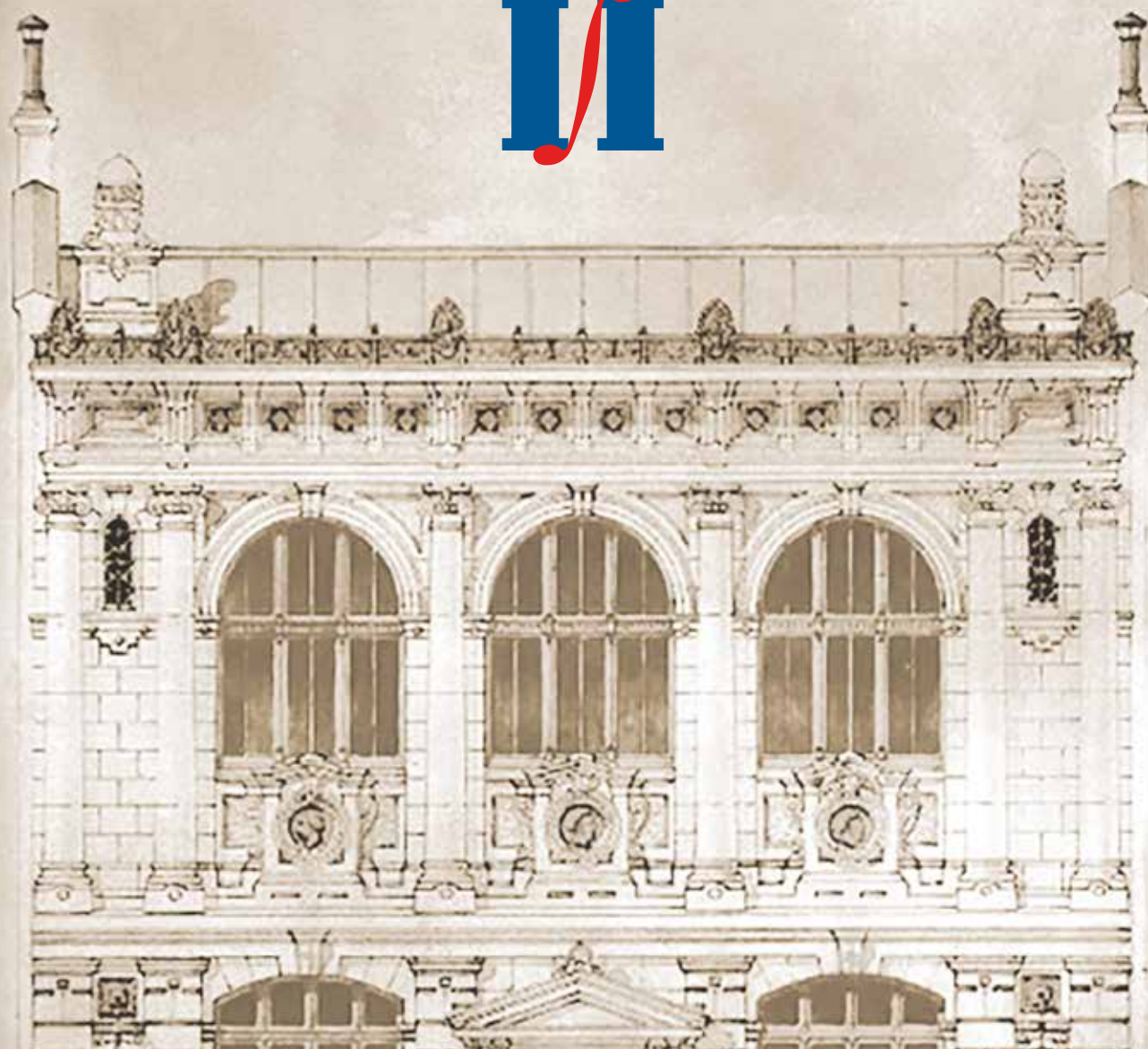
IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX CONSULTORES LTDA.

ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES LTDA.



Nuestros canales digitales:

Sitio web: www.iing.cl

Linkedin: <https://www.linkedin.com/company/64274333/admin/>

E-mail: iing@iing.cl · secretaria@institutodeingenierosdechile.cl

Nuestros teléfonos:

(+56) 22696 8647 · (+56) 93736 0656